



TAMPEREEN TEKNILLINEN YLIOPISTO  
TAMPERE UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

JESSE LAPPI

MUOVIENTULATYÖSTÖPROSESSIN LAADUNHALLINTA

Diplomityö

Tarkastaja: Pentti Järvelä  
Tarkastaja ja aihe hyväksytty teknisten tieteiden tiedekuntaneuvoston kokouksessa 5.6.2014.

## TIIVISTELMÄ

TAMPEREEN TEKNILLINEN YLIOPISTO

Materiaalitekniikan koulutusohjelma

LAPPI, JESSE: Muovien sulatyöstöprosessien laadunhallinta

Diplomityö, 82 sivua

Elokuu 2014

Pääaine: Muovi- ja elastomeeritekniikka

Tarkastaja: professori Pentti Järvelä

Avainsanat: Prosessinhallinta, optimointi, instrumentointi, Stasa QC, koesuunnittelu, Taguchin menetelmä

Muovien prosessointimenetelmien hallinta on tärkeimpiä yksittäisiä tekijöitä toimivan tuotannon ylläpitämisessä, minkä lisäksi muovimateriaalien ominaisuuksien, käytettävän laitteiston sekä näiden yhdistelmänä saatavan tuotteen ominaisuusprofiilin ymmärtäminen ovat tuotteiden menestyksen kannalta ehdottoman tärkeitä tekijöitä. Työn tavoitteena on tutkia erilaisten tuotteiden tuotannon optimointia ja sen tuomia etuja verrattuna perinteisiin optimointimenetelmiin.

Tämä työ pyrkii myös selventämään muovituotteiden prosessien optimoinnin käsitteitä, ja tarkastelemaan optimointiin käytettävän ohjelmiston tuomia etuja verrattuna perinteiseen koesuunnittelumenetelmään. Kirjallisuusselvityksen tuomat tiedot koesuunnittelun menetelmistä tuodaan tarkasteluun kokeiden suorittamisen aikana, ja näitä tuloksia verrataan optimointiohjelmistoon, joka esitellään myös kirjallisuusselvityksen yhteydessä. Kirjallisuusselvityksessä on tarkasteltu myös muovien prosessointimenetelmien instrumentointia, jota oli tarkoitus tutkia kokeellisessa osassa.

Tutkittujen prosessien optimointien yhteydessä löydettiin eroja Stasa QC - optimointiohjelmiston ja koesuunnittelumenetelmiin perustuvan Taguchin menetelmän välille. Tulosten mukaan Stasa QC toimii monenlaisten prosessien optimoinnissa riippumatta parametrien määrästä. Sen sijaan koekappaleiden lukumäärän rajoittaminen heikentää ohjelmiston kykyä muodostaa yhteyksiä koneen parametrien ja tuotteen ominaisuuksien välille. Verrattaessa Taguchin menetelmää sekä tätä tietokoneohjelmistoa voidaan havaita, että tietokonepohjaisella menetelmällä voidaan tarkastella suoraan tietokoneen ruudulta tuotteessa tapahtuvia muutoksia, kun taas Taguchin menetelmässä saadaan tulokset tutkituille tuotteen prosessointiparametreille, sekä niistä optimoitu yhdistelmä prosessoitua varten.

## ABSTRACT

TAMPERE UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

Master's Degree Programme in Materials technology

JESSE LAPPI: Quality management of plastics processing

Master of Science Thesis, 82 pages

August 2014

Major: Plastics and elastomers technology

Examiner: professor Pentti Järvelä

Keywords: Process control, optimization, Stasa QC, Design of experiments, DoE

Process control for plastics processing is one of the most important factors in maintaining successful production. Also understanding the plastic material, production equipment and the product's quality profile are absolutely necessary for commercial success. Goal for this thesis is to study and optimize different plastic production processes with software and also using traditional methods based on the Taguchi method.

This thesis will also try to clarify the different concepts of plastics processing optimization and to study the benefits of using software in comparison to the traditional design of experiments methods. In the literature research the different design-of-experiments methods are presented and their use is observed in the experimental part of this thesis. Also the instrumentation of different plastic production methods is under examination in the literature research, although the experimental part of instrumentation had to be neglected in the experiments.

Differences in the optimization methods, software and the Taguchi method, were observed in the experimental part. According to the results the software can perform well in different optimization environments, although limited amount of specimen will affect the model to be formed by the software. The amount of machine parameters or product quality parameters is not limited in the optimization, but a general recommendation is given. Stasa QC offers the possibility to study the effect of the machine parameters on the products measurements, whereas the Taguchi method only shows the effect of the parameter levels that were selected for the study.

## ALKUSANAT

Tämä opinnäytetyö tehtiin Tampereen teknillisen yliopiston muovi- ja elastomeeriteknikan osastolla PAHAMA-projektiin liittyen elokuun 2013 ja heinäkuun 2014 välisenä aikana. Projektin tavoitteena oli saada Lahden alueen muoviyritysten ja tutkimuslaitosten yhteistyötä tiivistettyä. Tästä syystä työssä oli myös mukana Uponor Suomi Oy, jonka tiloissa ja laitteistolla osa työn kokeellisesta osasta suoritettiin.

Ohjaajana työn suorittamisen aikana toimi Pentti Järvelä, jota kiitän mahdollisuudesta opinnäytetyön suorittamiseen sekä ohjauksesta työn aikana. Kiitokset myös Sauli Eerolalle työhön antamistasi kommentteista. Kiitokset kuuluvat myös Risto Ylitalolle ja Aleksis Tommiselle, jotka toimivat Uponor Suomi Oy:n kokeiden osalta työn ohjaajina ja koeajojen suunnittelijoina kanssani.

Mahtavasta työskentely-ympäristöstä kiitos Kaisulle ja Jarkolle, enkä voi jättää Riinaakaan mainitsematta näissä kiitoksissa. Samoin myös suuret kiitokset kaikille läheisilleni työn aikana antamastanne avusta ja tuesta. Ilman teitä tämä elämänvaihe olisi varmasti ollut aivan erilainen.

Tampere 23.7.2014

Jesse Lappi



## SISÄLLYS

1	Johdanto.....	8
2	Instrumentointi.....	10
2.1	Paineanturit .....	11
2.1.1	Pietsoresistiiviset anturit .....	11
2.1.2	Pietsoelektriset anturit.....	11
2.2	Lämpötila-anturit.....	12
2.2.1	Vastuslämpötila-anturit .....	12
2.2.2	Termoparit.....	13
2.2.3	Infrapunamittaus .....	13
2.3	Ruiskuvalu .....	13
2.4	Ekstruusio .....	14
2.5	Muut prosessointimenetelmät .....	16
2.6	Instrumentoinnin kustannukset .....	16
2.7	Antureiden tulevaisuuden kehitys .....	16
3	Menetelmät valmistusprosessien kontrollointiin ja optimointiin.....	18
3.1	Perinteiset valmistusprosessien kontrollointimenetelmät.....	18
3.2	Koesuunnittelumenetelmät .....	19
3.2.1	Koesuunnittelun täysi koesarja (Full-factorial design) .....	19
3.2.2	Osakoe (Fractional factorial method) .....	20
3.3	Taguchin menetelmä .....	22
3.4	Neuroverkot .....	25
3.5	Geneettiset algoritmit .....	28
3.6	Päästöä simuloivat algoritmit.....	30
3.7	Partikkeliparveen perustuvat algoritmit.....	31
3.8	Mäen kiipeämistä matkiva algoritmi .....	31
3.9	Eri menetelmien yhdistelmät .....	32
3.9.1	Neuroverkon ja geneettisen algoritmin yhteiskäyttö .....	32
4	Tietokoneohjelmistojen tarjoamat mahdollisuudet.....	34
4.1	Ohjelmistojen nykytilanne.....	34
4.1.1	Optimointiohjelmisto Stasa QC.....	35
4.1.2	Simulointiohjelmistot.....	36
4.2	Ohjelmiston käytön kustannukset .....	37
5	Kokeellinen osuus .....	38
5.1	Uponor Oy:n käynnissä olevan tuotantoprosessin optimointi Stasa QC – ohjelman avulla.....	38
5.2	Stasa QC -ohjelman ja Taguchin menetelmän vertailu vetokoesauvan prosessoinnissa.....	41
5.2.1	Taguchin menetelmän koeajo.....	44
5.3	Instrumentoitu ruiskuvalumuotti termoplasteille .....	44
5.4	Rotaatiovalulaitteiston käyttöönotto.....	48
5.5	Monikerroskalvon ekstruusio.....	50

6	Tulokset .....	51
6.1	Uponor Oy:n tuotantoprosessin optimointi Stasa QC – ohjelmalla .....	51
6.1.1	Optimointiprosessi .....	51
6.1.2	Optimituotteen ruiskuvalu .....	53
6.2	Stasa QC - ohjelman ja Taguchin menetelmän vertailu .....	55
6.2.1	Stasa QC -koeajon tulokset .....	57
6.2.2	Taguchin menetelmän tulokset .....	63
6.3	Instrumentoitu ruiskuvalumuotti termoelasteille .....	69
6.3.1	Koeajon tulokset .....	69
6.3.2	Optimoidun TPE - tuotteen ruiskuvalaminen .....	71

## TERMIT JA NIIDEN MÄÄRITELMÄT

Häviöfunktio	Taguchin menetelmässä käytetty funktio, joka kuvaa tuotteen poikkeamaa tavoitteesta.
Imu	Ruiskuvalutuotteessa havaittava painauma, joka johtuu kappaleen huonosta prosessoinnista ja kutistumisesta.
Insertti	Ruiskuvalettavan kappaleen sisään tuleva erillinen osa tuotetta, jonka ympärille ruiskuvalettava kappale muodostuu.
Purse	Prosessoinnin yhteydessä havaittava materiaalin työntyminen jakotasoon.
Sulautuminen	Koesuunnittelumenetelmien yhteydessä havaittava kahden sarakkeen vaikutusten yhdistyminen, jolloin eri sarakkeiden paramet- riyhdistelmien vaikutusta tuotteeseen ei saada selville.

# 1 JOHDANTO

Muovien sulatyöstäminen ja prosessien laadunhallinta on tavanomaisesti ollut osaamiseen ja kokemukseen perustuvaa työtä. Prosessoinnin kontrollointi on monien parametrien yhteisvaikutusten ymmärrystä vaativaa, ja tämä laaja ymmärrys on tavallisesti muodostunut työntekijälle vuosien työnteon kautta. Tämän lisäksi on perinteisesti käytetty erilaisia tilastollisia keinoja tuotannon ja prosessointiarvojen valvontaan [1]. Tämän opinnäytetyön puitteissa lähestytään muovien sulatyöstön kontrollointia tutkimalla instrumentoinnin hyötyjä muovien prosessoinnissa, kartoittamalla erilaisia tietokoneelaskentaan pohjautuvia malleja optimointiin, sekä tutkimalla erilaisia tietokoneille jo ole-massa olevia optimointi- ja simulointiohjelmistoja. Näiden kolmen suunnan pohjalta voidaan päästä syvempään ymmärrykseen nykyaikaisesta muovien sulatyöstöprosessista. Painottuminen ruiskuvaluun ja ekstruusioon on tehty muovien sulatyöstön nykyisten tuotantomäärien perusteella keskittyen yleisimpiin menetelmiin. Ruiskuvalun osuus on noin 32 % tuotannosta tänä päivänä ja se on eniten käytetty muovien prosessointimenetelmä ekstruusion jälkeen, jonka osuus kokonaisvalmistusmäärästä on noin 36 % [2, 3].

Jatkuvasti kasvavat vaatimukset toleransseiltaan tarkempia ja kerrospaksuuksiltaan ohuempia tuotteita sekä prosessoinnin kokonaishallintaa kohtaan ovat suunnanneet kiinnostuksen edellä esiteltyjen tietokonepohjaisten menetelmien suuntaan. Jo uuden tuotteen suunnittelusta alkaen vaikutetaan kustannuksiin, joita valmistuksessa tulee. Tuote- ja muottisuunnittelussa käytetään jo lähes poikkeuksetta virtausanalyysijä ja lujuuslaskennan menetelmiä, joiden avulla voidaan löytää helpoimmat tavat valmistaa tuote nopeasti ja siten, että se vastaa määrättyä ominaisuusprofiilia. Prosessin kokonaisoptimointi voidaan aloittaa siis jo tuotteen ideoinnin aikana [2]. Käynnissä oleviin prosesseihin ei voida enää vaikuttaa muuten kuin muuttamalla prosessoinnin parametreja, prosessointiin käytettävää konetta tai muottia sekä valmistuksessa käytettävää materiaalia. Näiden neljän vaikuttavan tekijän pohjalta voidaan myös optimoida tuotannon prosesseja ja tässä työssä pyritään myös selvittämään, millaisia tuloksia voidaan saada optimointiin kehitetyllä ohjelmalla jo käynnissä olevan ohjelman prosessin suhteen.

Prosessinhallinnan parantaminen mittaamalla suoraan materiaalin ominaisuuksia, kuten lämpötilaa tai painetta voidaan nähdä myös parannuksena prosessinhallintaan. Instrumentoinnin hyötyjä pyritään tutkimaan tässä opinnäytetyössä vertailemalla instrumentoidun ja instrumentoimattoman muotin käyttöä optimointiohjelmalla. Tavallisesti prosessikontrollia pidetään yllä prosessointiin käytettävän koneen parametreilla, jolloin prosessoitavan materiaalin ominaisuudet jäävät näiden epäsuorien parametrien taakse. Lopullisen tuotteen kannalta tärkeintä on materiaalin ominaisuuksien hyödyntäminen mahdollisimman hyvin, jolloin siitä voidaan valmistaa entistä tehokkaammin tuotteita

prosessin avulla. Esimerkiksi ruiskuvalettaessa materiaalin lämpötila ja paine muotissa ovat tärkeimmät tuotteen muotoutumiseen vaikuttavat tekijät, joten olisi toivottavaa pyrkiä ohjaamaan niitä suoraan. Nykyisessä tilanteessa koneen parametrit ohjaavat materiaalin ominaisuuksia, joista seuraavat tuotteen erilaiset ominaisuudet.

## 2 INSTRUMENTOINTI

Termillä ”instrumentointi” tarkoitetaan laajasti ymmärrettynä kaikkia niitä mittaustekniikoita, joilla prosessia valvotaan. Nykypäivän ruiskuvalukoneesta löytyy esimerkiksi mittausteistointi suuttimen ja putken eri osien lämpötilan mittaamiseen, jolloin voidaan sanoa, että nämä osat on instrumentoitu lämpötila-anturilla. Tämän opinnäytetyön puitteissa pyritään kuitenkin tutkimaan suoraan muovimateriaalin antamaa tietoa prosessista ja saamaan sitä kautta tarkempi käsitys prosessista. Suoralla mittauksella prosessin sisältä voidaan myös säästää aikaa ja saada tietoa suuremmasta materiaalinäytteestä verrattuna laboratoriotestien suorittamiseen. Prosessin sisällä mitatut arvot (*in-process measurement*) eroavat laboratoriotesteistä (*off-line measurement*), koska muovien herkkyys lämpötilan vaikutuksille muuttaa materiaalin mittaustuloksia. Esimerkiksi laboratoriossa tehtävässä reometrimittauksessa pitkä lämpöaltistus voi muuttaa muovin ominaisuuksia. Laboratoriotestien ja prosessin sisällä tehtävien mittausten välille sijoittuvat prosessin aikana tehdyt mittaukset (*on-line measurement*), jotka tehdään prosessin ollessa käynnissä, mutta varsinaisen prosessin ulkopuolella. Erillinen suutin reometrille ekstruderissa on tästä esimerkitapaus. Tällöin reometrissa käytettävää muodonmuutosnopeutta voidaan vaihdella prosessista riippumatta, toisin kuin prosessin sisällä tehtävissä mittauksissa. [4]

Nykyisellään prosessoinnissa voidaan käyttää useita antureita, joilla tähdätään valmistusprosessin valvontaan valmistettujen tuotteiden tarkastamisen sijaan. Esimerkiksi ruiskuvalussa koneen ohjaamiseen liittyvien parametrien, kuten suuttimen lämpötilan tai ruiskutusnopeuden lisäksi tulisi tietää, miten näiden muuttaminen vaikuttaa prosessiin ja sitä kautta lopulliseen tuotteeseen. Antureiden avulla voidaan mitata suoraan esimerkiksi sulan lämpötilaa tai painetta muotissa ruiskuvaluprosessissa. Näillä mittauksilla voidaan parantaa tuotannon valvontaa verrattuna perinteiseen tapaan, jossa tilastollisesti esimerkiksi tietyin väliajoin tarkastetaan tuotantoeriä. Tuotannon kontrollointiin linjan ollessa käynnissä (*on-line monitoring*) on kehitetty malli, jonka pohjalta voidaan nopeuttaa reagointia tuotteessa ilmenneeseen vikaan tai ongelmaan. Vastaavasti käyttämällä sopivaa mallia voidaan liittää koneen ohjauksessa käytettävät parametrit tuotteen ominaisuuksiin ja saada aikaan automaattinen laadunvalvonta tuotteen valmistusprosessille. Jotta koneen ohjauksen parametrit voidaan liittää tuotteen ominaisuuksiin, tulee käyttää instrumentointia apuna, sillä esimerkiksi materiaalissa tapahtuvat muutokset eivät välttämättä vaikuta koneen suorituskäytännön siten, että ero normaalitilanteeseen havaittaisiin. Jolloin suorat mittaukset materiaalista antavat tietoa materiaalissa tapahtuvista muutoksista paremmin. [1, 5]

Lähtökohtaisesti prosessista tulisi löytää mitattavissa oleva muuttuja, joka on herkkä materiaalisissa tai prosessin oloissa tapahtuville muutoksille. Mikäli tämä muuttuja on myös vakaa ja suorassa suhteessa tuotteen lopulliseen laatuun, on löydetty ideaalinen muuttuja prosessista. Antureiden sijoittamista varten täytyy luonnollisesti tietää mitattava suure. Tyypillisin anturoitava suure on paine, sillä se antaa hyvin paljon tietoa prosessista. Tämän jälkeen täytyy ottaa huomioon, että mittausta paikan sijainti vaikuttaa saataviin mittaustuloksiin. Tästä syystä vertailu eri muottien välillä voi olla ongelmallista. Mittaamisen lisäksi mittauksista saatavan tiedon muodon tulee olla tietokoneille sopiva, sillä prosessin aikana käsitellään suuria määriä tietoa ja mittaustuloksia. Tällöin yhteensopivuus eri laitteistojen välillä nopeuttaa toimintaa. [5, 6]

## **2.1 Paineanturit**

Paineen mittaaminen prosessin sisältä voidaan tehdä kahdella erilaisella anturilla, jotka esitellään seuraavaksi. Näiden anturityyppien yhdistäminen lämpötila-anturiin on mahdollista tehdä pietsoelektrisen paineanturin kanssa. Se on kooltaan riittävän pieni, jotta siihen voidaan yhdistää myös lämpötilan mittaamisominaisuus. Paineen mittaaminen prosesseista on ensiarvoisen tärkeää, sillä sen pohjalta materiaalin käytös prosessin aikana tulee toteutumaan.

### **2.1.1 Pietsoresistiiviset anturit**

Pietsoresistiiviset jännitysanturit perustuvat piikalvon venymisliikkeisiin. Anturin rakenteessa on piikalvon lisäksi neljä keskenään samankaltaista pietsoresistoria, joiden vastus muuttuu, kun ne venyvät ja supistuvat kalvon mukana. Vastuksen muutos on verrannollinen kalvon muodonmuutoksen suuruuteen. Kalvon muodonmuutos määrittää myös paineanturin mittausalueen, sillä paksumpaa kalvoa käyttämällä muodonmuutos pienenee ja voidaan mitata suurempia paineita. Jos kalvon paksuus tuplataan, sen herkkyys pienenee neljäsosaan. Ohuimmillaan kalvon paksuutena voidaan käyttää viittä mikronia, ja tyypillisesti paksuimpina kalvoina on käytetty 200 mikronin paksuisia kalvoja. Jännitysanturien koko aiheuttaa ongelmia ruiskuvalun yhteydessä, sillä ne tulee erottaa korkeasta lämpötilasta ja mahdollisesti korrodoivasta ympäristöstä. [3, 7]

### **2.1.2 Pietsoelektriset anturit**

Pietsoelektriset anturit kehitettiin korvaamaan pietsoresistiivisiä antureita. Niiden mitta-alue on suurimmillaan 108-kertainen suurimman ja pienimmän mittausravon suhteena ilmoitettuna. Näiden antureiden rakenteessa on mittaavassa pinnassa ohut kalvo, jonka alla resistiivisyyden muutoksen kokeva kide-elementti on suojassa. Elementin kokoonpanossa on useita kiteitä ja sovelluskohteesta riippuen ne voivat olla joko vaakasuorassa tai pystyasennossa paineen suhteen. Kide-elementti on umpinaisen kotelon sisällä suojattuna ja kotelon ulkopinnassa on kierteet sensorin kiinnittämiseksi mittaustulosten ympäristöön. Käytettäessä yksittäiskidettä mittaamiseen ominaisuudet säilyvät parem-

min ja mittauksen toistettavuus on myös parempi. Ruiskuvalun yhteydessä sula muovi jähmettyessään muodostaa itse kidettä suojaavan kalvon, jolloin erillisen kalvon käyttö ruiskuvalumuotissa on turhaa. Kalvon jättäminen pois rakenteesta myös pidentää anturin käyttöikää. Sensorin pinta voidaan muotoilla muotin pinnan mukaiseksi, jotta sen jättämä jälki olisi mahdollisimman huomaamaton. Tänä päivänä piezoelektriset anturit ovat enemmässä määrin käytössä ruiskuvalussa, sillä niiden ominaisuudet sopivat paremmin dynaamisen prosessin mittaustarkoituksiin. [3, 7]

## 2.2 Lämpötila-anturit

Paineen lisäksi hyvin tärkeä tekijä on lämpötila, sen mittaamiseen voidaan käyttää termoparia, vastuslämpötila-anturia tai infrapunasäteilyn tunnistavaa anturia. Termopari ja vastuslämpötila-anturi ovat kosketuksissa mitattavaan kohteeseen, mutta infrapunasäteilyä mitattaessa tehdään mittaus irti mitattavasta kohteesta. Näillä eri menetelmillä on omat sovelluskohteensa ja ne ovat joissain tilanteissa vertailtavissa jonkin tietyn kohteen lämpötilan mittaamiseen. Kontaktissa olevat mittaustavat ovat hyviä kiinteiden aineiden, nesteiden ja kaasujen lämpötilojen mittaamiseen laajalla lämpötila-alueella. Infrapunaspektriä käytettäessä kaasut rajautuvat ulos näistä mittaustarkoituksista niiden läpäisykyvyn takia. Kontaktimittauksen yhteydessä tulee huomioida nopeiden lämpötilan muutosten yhteydessä, että anturin oma massa tasoittaa ja vähentää lämpötilan mittaustarkkuutta nopeiden lämpötilan laskujen ja nousujen aikana. Huomionarvoinen seikka on myös mitattavassa kohteessa käytettävä lämpötilahallinta. Sillä jos esimerkiksi ruiskuvalulaitteiston sulalle muoville käyttämä hallintamenetelmä vaihtelee useita asteita, on turhaa hankkia asteen kymmenyksen tarkkuudella muotissa lämpötilaa mittaava lämpötila-anturi. Edullisemmalla anturilla voidaan saada mitattua aivan vastaavat tulokset, sillä lämpötilan pienet muutokset sulassa ja sitä kautta muotissa ovat prosessin omaa sisäistä vaihtelua, jonka mittaaminen voi olla verrattain turhaa. [7]

### 2.2.1 Vastuslämpötila-anturit

Vastuslämpötila-antureiden (*resistance-temperature detectors*) käyttäminen perustuu metallilankaan, jonka resistanssi muuttuu lämpötilan funktiona. Materiaalielementti on rullalle kierretty metallilanka tai sähköä johtava kalvo, johon johtimet on kiinnitetty. Metallilanka tai kalvo suljetaan keraamisen suojan alle. Langan materiaaleina käytetään platinaa, nikkeliä, rautanikkelseosta, volframia ja kuparia. Näistä materiaaleista vakaimmaksi on todettu platina, jolla on myös laajin lämpötilan mittaustalue. Vastuslämpötila-antureiden herkkyyden ylittää termoparien herkkyyden jopa 60-kertaisesti, mutta vasteaika on hitaampi verrattuna termopariin. Ongelmallista vastuslämpötila-anturien käytössä on niiden korkea hinta ja suuri koko. [7]



### 2.2.2 Termoparit

Termoparin toiminta perustuu kahden eri metalliseoksesta valmistetun langan toimintaan siten, että niistä tehdyt langat ovat kummastakin päästä kiinni toisissaan. Toinen näistä liitoksista pidetään vakioidussa lämpötilassa, jolloin toisen pään lämpötilan muuttuessa syntyy jännite tähän suljettuun silmukkaan. Tämä jännite voidaan ennustaa ja sen pohjalta määrittää tuntematon lämpötila. On olemassa erityyppisiä termopareja eri lämpötila-alueille ja ne on nimetty J-, K-, T-, N-, R&S- ja B- sekä E-tyypin antureiksi niissä käytettyjen eri metalliseosten ja käyttöympäristöjen pohjalta. Termopareilla voidaan eri metalleja ja anturin muotoiluja käyttäen saavuttaa lämpötilat -200 ja 2315 °C väliltä. Näistä K-tyypin antureita käytetään ekstruusiassa. Myös erilaisia tapoja kiinnittää langat toisiinsa on käytössä, näistä kaupallisesti käytettyjä ovat maadoitettu, eristetty maadoittamaton sekä avoin liitos. Termoparien käyttöä voidaan perustella edullisella hinnalla, riittävän nopealla vasteajalla, muunneltavuudella ja sillä, että ne on helppo vaihtaa haajoamisen jälkeen [8]. [3, 7, 9]

### 2.2.3 Infrapunamittaus

Toistaiseksi vielä hieman harvinaisempi tapa mitata lämpötilaa on infrapunamittaus. Se perustuu materiaalin säteilemään infrapunasäteilyyn. Kaikki kappaleet nollan Kelvinasteen yläpuolella säteilevät infrapunasäteilyä. Tällä menetelmällä voidaan mitata lämpötiloja myös ilman suoraa kosketusta materiaaliin, vaikka infrapunamittausta käytetään myös esimerkiksi ekstruuderin putken seinämään upotettuna. Välttämällä suoraa kosketusta materiaaliin voidaan vähentää virtauksen aiheuttamaa kitkalämmön vaikutusta. IR-mittaus toimii hyvin nopeiden lämpötilavaihteluiden mittaajana, koska sen reaktioaika on jopa 10 ms. Samoin sillä voidaan saada mittaustulos syvemmältä virtauksen sisäältä. Mutta eri materiaalien vaihtelevat ominaisuudet kuten emissiivisyys vaikeuttavat mittaamista. Eri materiaalien emissiivisyydet vaikuttavat infrapunan tunkeutumiseen sulaan, jolloin lämpötila mitataan siis eri syvyyksiltä, koska emissiivisyys muuttuu materiaalista toiseen. Esimerkiksi täyteaineettomalle polypropeenille mittaussyvyys voi olla 1 - 6 mm väliltä, mutta 20 % talkkia tai nokimustaa sisältävälle polypropeenille vastaava arvo on 0 - 0,033 mm. Kovalle PVC:lle nämä arvot ovat 6 - 7 mm väliltä. [10, 11, 12]

## 2.3 Ruiskuvalu

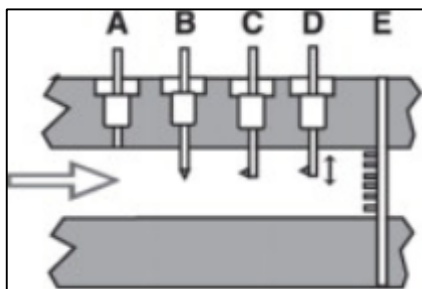
Ruiskuvalussa hyvin tärkeänä osana oleva muotti tulee instrumentoida, jos halutaan saada tietoa siinä tapahtuvasta muovisulan jäähtymisestä ja paineen muutoksista. Myös suuttimen paineen mittaaminen ruiskuvalulaitteiston mittaaman paineen lisäksi tuo lisätietoa muovisulan tilasta prosessin aikana [13]. Tätä ruiskutuspainetta mitataankin jo. Paine- tai lämpötila-anturi tulee mieluiten sijoittaa kauimmas juoksukanavasta, jota pitkin muovisula ruiskutetaan muottiin. Jos käytetään paineen valvonnassa yhtä paineanturia prosessin sisällä, sen sijoittaminen virtauksen loppupäähän tuo selkeyttä prosessiin,

koska se kertoo muotin täyttymisestä paremmin kuin lähellä sisääntuloa oleva anturi. Sisään virtaavan muovin paine vaihtelee muotin mittojen mukaan, jolloin sen arvot muuttuvat paljonkin valun aikana. Tällöin esimerkiksi vaihtopisteen perustuessa painearvoon voidaan vahingossa siirtyä prosessissa jälkipaineen pitoon, vaikka muotti ei olisi edes kokonaan täyttynyt. Mikäli käytössä on monikammioinen muotti, voi eri kammioissa olla hieman eroja painearvojen tai muiden mitattavien suureiden välillä, joten tällaisen muotin instrumentoinnissa pitäisi mitata painetta eri kammioista. Näitä eroja voidaan pyrkiä välttämään symmetrisellä muotilla ja symmetrisillä syöttökanavilla. Nämä ehdot voidaan täyttää muotin suunnittelun yhteydessä, jolloin tehdään suunnitteluprosessiin kuuluva virtausanalyysi. [3, 6, 13]

Edellä mainitusti ruiskuvaluprosesseissa paineen mittaamiseen käytetään usein pietsosähköisiä antureita, jotka asennetaan suoraan muotin seinämään. Näiden anturien on todettu olevan hyviä lyhyen sykliajan tuotantoon korkeammissa lämpötiloissa ja tarkkaa toleranssia vaativissa tuotteissa, joten ruiskuvalussa ne toimivat hyvin. Anturin pinta tulee syntyvän tuotteen pintaa vasten ja tästä syystä anturin pinnanlaatu pyritään saamaan samanlaiseksi muun muotin kanssa, jolloin anturista jää mahdollisimman huomaamaton jälki. Anturien tyypillinen halkaisija muotin pinnassa on 4-8 mm (kuvia), mutta pienimmillään voidaan käyttää halkaisijaltaan jopa 1mm antureita. [7]

## 2.4 Ekstruusio

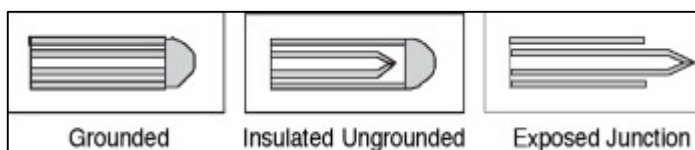
Esimerkiksi profiilien ja putkien valmistuksessa käytettävä ekstruusio voidaan myös instrumentoida, jolloin seurataan sulan muovin painetta ja lämpötilaa sen puristuessa läpi käytetystä muotista. Näiden keskeisten parametrien lisäksi eri ekstruusiomenetelmissä voidaan mitata ja sitä kautta hallita myös syntyvän tuotteen dimensioita, viilenysveden lämpötilaa ja ekstruusiotuotteen vetonopeutta. Suoraan sulan materiaalin lämpötilan mittaamiseen voidaan käyttää termopareja, jotka sijoitetaan virtaavan sulan sekaan tai putken seinämään. Tällöin tulee huomioida putken seinämän lämpötilan vaikutus mittaustulokseen, sillä putken seinämään upotettu anturi mittaa osittain myös seinämän lämpötilaa. Seinämään upotetun anturin kyky reagoida muuttuvaan lämpötilaan on myös tutkitusti huono [10]. Kauempana seinämästä mitattu lämpötila antaa paremman tuloksen varsinaisen materiaalin lämpötilan suhteen, vaikka tällöin mittausanturi voikin muodostaa kitkalämpöä sulan virtaamisen takia. Kuvassa 2.1 on esitelty näitä eri tapoja asentaa anturi sulan sekaan tai seinämään. Kuvan B ja C asennuksessa erona on vain termoparin pään suuntaaminen sulan suunnan muakisesti, jotta kitkalämmön määrä pysyisi pienenä. Vaihtoehto D on liikuteltava termopari, jonka etäisyyttä voidaan säätää.



**Kuva 2.1.** Ekstruusiassa käytettävissä olevat termoparin asennustavat [14].

Käytettäessä säädeltävää anturia voidaan tutkia prosessin lämpötiloja eri etäisyyksillä putken seinämästä, jos suoritetaan peräkkäisiä ajoja vaihtaen anturin paikkaa välissä. Samaan tapaan toimivat myös termoparisillat, joilla voidaan muodostaa useasta kohdasta mitatuista arvoista lämpötilaprofiili yhdellä mittauksella. Tällainen termoparisilta on kuvan 2.1 vaihtoehto E. Lämpötilaprofiilin mittaus antaa huomattavasti tarkemman kuvauksen putkessa olevan sulan lämpötilasta verrattuna yksittäisen anturin mittaamaan arvoon. Tässä menetelmässä on siis useita termopareja yhdessä verkkomaisessa rakenteessa, jolloin saadaan useita mittausarvoja samalta ajanhetkeltä. Tällainen ratkaisu ei tosin vielä ole teollisen mittakaavan käytössä, koska se ei ole riittävän varma ja vakaa. Yksittäisen termoparisensorin hajoaminen rakenteessa aiheuttaa aina tuotantoseisokin ja monen sensorin ollessa käytössä seisokkiaika kasvaa tällöin moninkertaiseksi.

Tyypillisimmin käytetty termopari ekstruusioprosesseissa on keltaisella värillä varustettu K-tyyppi. Niissä käytetyt langat ovat nikkeli-kromi- ja nikkeli-alumiiniseoksia ja niiden toimintalämpötila ulottuu yli 700 asteen lämpötilaan asti. Termoparin langat kiinnitetään tavallisesti eristetyllä ja maadoittamattomalla liitoksella. Tämän liitostyyppin lisäksi on myös olemassa kaksi muuta tapaa liittää päät yhteen. Maadoitetussa (*grounded*) liitostyyppissä saadaan suojattua liitos sähkömagneettiselta induktiolt ja radiotaajuisilta häiriöiltä. Nämä erityyppiset liitokset ovat nähtävissä kuvassa 2.2 alla. [10, 11, 14]



**Kuva 2.2.** Maadoitettu, eristetty maadoittamaton, sekä paljas liitos termoparielementissä ekstruusiomenetelmien mittaamiseen. [14]

Ekstruusiassa paineen mittaaminen tehdään ennen reikäkiekkoa sekä muotissa, ennen kuin materiaali puristuu ulos määrätyssä muodossaan. Muutos toisessa tai molemmissa näistä aiheuttaa lopulliseen tuotteeseen jonkinasteisia muutoksia riippuen paineiden muutosten suuruudesta. Ennen reikäkiekkoa mitattu paineen arvo vaihtelee luonnollisesti materiaalia työntävän ruuvien kierteiden takia, koska ne aiheuttavat muovisulaan sykäyksittäisiä puristusvoimia. Tästä syystä pitäisi myös välttää paineanturin sijoitta-

mista seinämään ruuvien kohdalle. Ruuvien ja reikäkiekon välille sijoitettuna paineanturi antaa hyvän vertailuarvon muotista mitatulle paineelle, jonka tulee olla likimain vakio, jotta ulos työntyvä materiaali virtaa tasaisesti. [14]

## 2.5 Muut prosessointimenetelmät

Kullekin prosessointimenetelmälle voidaan määrittää tärkeimmät parametrit, joilla prosessi toimii ja joilla sitä säädetään. Tällöin luonnollisesti näiden parametrien mittaaminen tulee tarpeelliseksi. Esimerkiksi ekstruusiolla tehtävässä pinnoituksessa kalvon lämpötilan mittaamiseen voidaan käyttää etämittaukseen infrapunatekniikkaa, joka esiteltiin jo lämpötila-antureiden kohdalla kappaleessa 2.1. Tällä tavalla voidaan välttää kalvon pinnan rikkominen tai sen muodon muuttaminen yksittäisellä mittauspisteellä. [10]

## 2.6 Instrumentoinnin kustannukset

Instrumentoinnin liittäminen olemassa olevaan prosessiin tuo mukanaan kuluja muotin muokkauksesta ja uusista antureista. Näiden lisäksi muotin rakenne voi rajoittaa antureiden asennuspaikkojen valikoimaa, jolloin mittauksista saatava tieto voi olla laadultaan heikompaa verrattuna tilanteeseen, jossa muotti on suunniteltu jo alusta asti instrumentoitavaksi. Samalla tavalla jo suunnittelun yhteydessä voidaan saada muottikustannukset pysymään alhaalla. Instrumentoinnin hintaluokka on yksittäiselle paineanturille 1000 euroa kappaleelta. Jos halutaan mitata samaan aikaan sekä lämpötilaa että painetta, tämä voidaan tehdä yhdistetyllä paine-lämpötila-anturilla, joka on hinnaltaan 1600 euroa kappaleelta. Näistä pelkän paineanturin käyttö on hyvin suositeltavaa ja lämpötila-anturoinnilla voidaan saada lisätietoja, jos niitä tarvitaan. Paineanturi antaa noin 80 % tärkeimmistä tiedoista, jolloin lämpötilan mittaaminen tulee useimmissa tapauksissa tarpeettomaksi. [15]

## 2.7 Antureiden tulevaisuuden kehitys

Yksi suurimpia ongelmia nykyisten anturien käytössä on niiden tarvitsema johdotus, joka tuo sähkövirtaa anturille ja vie mittausdataa käyttäjälle. Ruiskuvalussa käytettäessä tilanpuute voi haitata instrumentointia, sillä useiden antureiden johdot vievät merkittävästi tilaa muotin ympäriltä. Instrumentointia ei saada tällöin välttämättä tehtyä niin laajasti kuin haluttaisiin. Toinen ongelma johtojen käytössä tulee mukaan käytettäessä liikkuvaa muottia, kuten esimerkiksi rotaatiovalussa. Rotaatiovalumuotin ympärillä on tavallisesti melko paljon tilaa, mutta liikkueessaan jopa kolmen akselin suhteen tämän prosessin arvojen mittaaminen vaatii erilaisia hiiliharjoja akseleihin tiedon ja sähköön välittämiseksi antureille. [7]

Ratkaisuna johtojen käytön tuomiin ongelmiin on tutkittu langattomia mittausantureita. Ne lähettävät tietoa erilaisten radioverkkojen kautta vastaanottimeen, joka tallentaa tiedot. Yksi vastaanotin voi vastaanottaa useita signaaleja erilaisilta antureilta sääs-

täen siis tilaa. Langaton anturi on myös mahdollista sijoittaa vaikeammin tavoitettavaan paikkaan, koska johdotusta ei tarvitse vetää mukana. Tiedon lähettäminen langattomasti vaatii joko akun tuomaa virtaa, tai mahdollisuuden ottaa prosessin paineesta tai lämmöstä toimintavirtaa jollakin menetelmällä. Akun käyttäminen anturin virtalähteenä on toimiva ratkaisu, mutta sen vaihtamiseen kuluvan ajan mukanaan tuoma pakollinen huolto-  
tauko lisää tuottamatonta aikaa. Jos tämä halutaan välttää, voidaan etsiä mahdollisuuksia käyttää oman virtansa suoraan prosessista ottavia ratkaisuja [16, 17]. Tällaiset sovellutukset ovat vielä kuitenkin kehityksen alla. Luonnollisesti vähentämällä siirrettävän datan määrää pakkaamalla ja siirtämällä dataa harvemmin voidaan vähentää virrankulutusta. Tämä johtuu siitä, että datan siirtäminen on usein eniten virtaa kuluttava osa anturijärjestelmässä. Myös vastaanottimen ja lähettimen välinen etäisyys kasvattaa tarvittavaa virran määrää siten, että etäisyyden kaksinkertaistuessa signaali heikkenee neljäsosaan alkuperäisestä [18]. Vähäisen virrankulutuksen lisäksi ohjelmoitavuus ja nopea tiedon kerääminen ovat ideaalisia ominaisuuksia sensorille. Myös pitkän aikavälin mitaustarkkuus ja helppo huolettavuus sekä halpa hinta ovat toivottavia ominaisuuksia. [7, 18]

Tulevaisuuden uusina sovelluksina langattomien ja itselleen virtaa kehittävien antureiden lisäksi voidaan tulevaisuudessa mahdollisesti saada virtuaalisia antureita ja myös ultraääneen perustuvia antureita. Ultraääniantureiden avulla voidaan saada tieto edellä kuvatuista paineesta ja lämpötilasta ekstruusioprosessissa, mutta niiden lisäksi myös esimerkiksi ruiskuvalulla valmistetun kappaleen kiinteytyminen ja tässä prosessissa tapahtuva kiinteytymisrintaman eteneminen kappaleen sisään on mahdollista havaita ultraäänellä [19]. Myös morfologian muodostumista ja polymeeriketjujen orientaatiota on tutkittu jo [20].

Virtuaaliset anturit eivät nimensä mukaisesti ole oikeita fyysisiä antureita, vaan tietyn prosessiparametrin tai –parametrien tietokoneella algoritmien avulla laskettuja arvoja jollekin anturoitavalle parametrille. Tällaisesta ja vastaavista menetelmistä voidaan yleisesti käyttää myös nimitystä pehmeä aistiminen (soft sensing) kuvaamaan sen perustumista epäsuoraan tietoon asioiden tilasta. Näiden antureiden toimintaa on tutkittu muun muassa muovisulan etenemisrintaman mallintamiseen käyttäen ruiskutusyksikön hydraulipainetta, ruuvin asentoa ja suuttimen painetta. Periaate virtuaalisen anturin taustalla lähenee siis seuraavassa kappaleessa käsiteltäviä laskennallisia malleja, jotka siis myös laskevat algoritmein, ja muiden menetelmien avulla tutkittavan parametrin arvoja. [21]

## 3 MENETELMÄT VALMISTUSPROSESSIN KONTROLLOINTIIN JA OPTIMOINTIIN

Valmistuksen yhteydessä erilaisten parametrien optimoinnilla voidaan esimerkiksi saavuttaa huomattava tuotannon määrän kasvu laadun kärsimättä. Perinteisen kokeilun ja erehdyksen kautta optimoinnin sijaan voidaan käyttää erilaisia laskentaan perustuvia menetelmiä, joilla voidaan saavuttaa nopeammin parempia tuloksia. Seuraavissa kappaleissa esitellään erilaisia matemaattisia menetelmiä, joilla optimointia voidaan tehdä. Perusteellista matemaattista esitystapaa ei käytetä, vaan eri menetelmistä luodaan yleinen kuva, jonka pohjalta asioita voi lähestyä. Kuvattujen menetelmien yhdistelmiä on mahdollista käyttää prosessitilanteiden ratkaisemiseen, ja myös tähän asiaan paneudutaan luvun lopussa.

### 3.1 Perinteiset valmistusprosessin kontrollointimenetelmät

Tuotteiden laadun ja valmistusprosessin valvontaa suoritetaan toisistaan erillisinä toimintoina mittaamalla valmistettujen tuotteiden halutut ominaisuudet ja pitämällä prosessointiarvot mahdollisimman vakioina esimerkiksi tilastoimalla niitä tasaisin väliajoin. Mikäli mittauksissa ilmenee reagointia vaativia ongelmia tuotteessa, joudutaan prosessointiparametreja muuttamaan. Muutettaessa eri arvoja voidaan käyttää tukena edellä mainittuja tilastoituja prosessointiparametreja tai toisena vaihtoehtona pyrkiä henkilöstön osaamiseen pohjaavalla ratkaisulla nopeaan ongelman korjaukseen. On melko helppo ennustaa tuotteen laatu, jos uutena parametriyhdistelmänä käytetään suoraan tilastoista otettua tuttua yhdistelmää. Jos nämä yhdistelmät eivät toimi, pitää seuraavaksi kehittää uusi parametriyhdistelmä. Tällöin tilastoinnin tuoma etu hieman kärsii, sillä yksittäisten parametrien vaihtelu aiheuttaa usein muutoksia tuotteeseen myös parametrien keskinäisten vaikutusten takia. Seurauksena tästä ongelmanratkaisuun kuluva aika kasvaa, jolloin kulut kasvavat mukana. Mikäli käytettävissä on pitkään prosessointia tehneitä sulatyöstäjiä, voidaan tukeutua heidän kokemukseensa. Vuosien työnteon seurauksena vaihtelevat prosessointitilanteet ovat tulleet työntekijöille tutuiksi ja on mahdollista löytää ratkaisu nopeastikin. Ongelma tällaisessa tilanteessa on usein liittyvä näiden kokeneiden työntekijöiden pysyvyyteen ja saatavuuteen, sillä heidän osaamisensa on luonnollisesti kysyttyä. [1]

## 3.2 Koesuunnittelumenetelmät

Yleisellä tasolla koesuunnittelun metodeilla voidaan tutkia ja parantaa tuotteiden normaalia käytännön toimintaa ja vähentää tuotannon hukkaa tai uudelleentyöstöjen tarvetta. Myös tuotekehityksen nopeuttaminen tai tuotannon laadun tasaaminen ovat mahdollisia esimerkkejä koesuunnittelun käytöstä. Kun tunnetaan erilaiset tuotteen laatuun vaikuttavat tekijät ja tekijöiden vaikutuksen voimakkuus on mahdollista hallita laatua paremmin. Muovien prosessointimenetelmien yhteydessä voidaan esimerkiksi tutkia eri prosessointiparametrien vaikutusta toisiinsa ja yhteisvaikutusta tuotteeseen. Koesuunnittelu perustuu eri parametrien vaihtelemiseen ja tulosten, eli tuotteen mitattavien ominaisuuksien vertailuun muutosten pohjalta. [22]

Koesuunnittelu voidaan jakaa kahteen pääluokkaan, kaikkien parametrien keskinäisiä vaikutuksia testaaviin täysiin kokeisiin (*full-factorial test*) ja osakokeisiin (*fractional factorial test*). Nämä menetelmät etenevät samalla tavalla riippumatta kumpaa käytetään. Aluksi tarkastellaan käsillä olevaa ongelmaa ja määritetään tavoite kokeelle. Tämän jälkeen tehdään koesuunnitelma, jonka yhteydessä määritetään kokeessa tutkittavat parametrit, jotka ovat tuotteen laadun kannalta tärkeimmät. Tämän jälkeen viedään koe läpi ja sen perusteella optimoidaan prosessi. Kun optimointi on tehty, testataan saatu tulos vielä käytännössä. Ottamalla mukaan koesuunnitelmaan vain tärkeimmät parametrit voidaan välttää turhaa testaamista. Myös satunnaistaminen on tärkeää, koska sillä voidaan saada poistettua prosessissa ja sitä kautta myös kokeessa mahdollisesti mukana olevat puolueellisuudet. Puolueellisuuden poistaminen auttaa eri vaihtoehtoina testattavia parametreja toimimaan mahdollisimman tasapuolisesti. Satunnaistamista voidaan siis pitää testaajan ”tapaturmavakuutuksena” [22].

Mahdollisena keinona kokeessa voidaan käyttää toistamista, se tarkoittaa koko kokeen tai yhden kokeen osan toistamista samanlaisena. Toisto kokeen sisällä tuo mahdollisuuden tutkia kokeellisen virheen suuruutta ja sitä kautta eri tekijöiden ja tekijöiden vuorovaikutusten vaikutusta tuloksiin. Mikäli tietyillä parametreilla tehdään vain yksi koesarja, voivat kokeen virheet peittää tekijöiden keskinäisiä vaikutuksia toisiinsa tai jopa yksittäisten tekijöiden suoraa vaikutusta. Mittausten toistaminen on ongelmallista siinä tapauksessa, jos kokeiden tekoon kuluu runsaasti aikaa. Esimerkkinä prosessointitekniikoista voidaan mieltää vaikkapa rotaatiovalua, joka on pisimpiä prosessointiaikoja vaativa menetelmä. Jos yhden tuotteen valmistaminen vaatii esimerkiksi tunnin sykliajan, tulee hyvin tärkeäksi määrittää sopivasti rajattu tuotteiden joukko. [22, 23]

### 3.2.1 Koesuunnittelun täysi koesarja (Full-factorial experiment)

Toisessa koesuunnittelun pääluokassa, täydessä kokeessa (*full-factorial experiment*), testataan kaikkien eri parametrien kaikki vuorovaikutukset sisällyttämällä kokeeseen kaikki mahdolliset yhdistelmät eri parametreista. Täyden koesarjan kokeen suurin ongelma on yksinkertaisesti siinä, että kokeen koko kasvaa eksponentiaalisesti lisättäessä uusia tutkittavia parametreja tai parametrien vaihtoehtoja. Koekappaleiden määrä voidaan laskea lausekkeella

$$N = m(n_1)^k, \quad (1)$$

jossa  $m$  on kokeen toistojen määrä,  $n_1$  on kokeessa käytettävien vaihtoehtojen määrä tutkittavalle ominaisuudelle ja  $k$  tutkittavien parametrien lukumäärä. Tällöin siis kaavan (1) perusteella esimerkiksi neljällä parametrilla ja kahdella vaihtoehdolla parametreiksi tulee kokeeseen  $24=16$  parametriyhdistelmää, jos ei tehdä samaa koetta useasti. Suunnitteluprosessissa valitaan nämä lausekkeen muuttujat ja pohditaan taustalla vaikuttavia muuttujia. Tämän lisäksi tulee myös satunnaistaa kokeen järjestys, jolloin eri parametrien vaikutus johtuu selvästi käytetyistä vaihtoehdoista. Erilaisten prosessointimenetelmien yhteydessä on usein pakollista vertailla kolmea arvoa prosessoinnin vaihtoehtoina. Tällaisessa tilanteessa edellä kuvattu esimerkki muuttuisi  $3^4$ , eli yhteensä 81 eri parametriyhdistelmää sisältäväksi kokeeksi. Tällaisen kokeen suorittaminen vie huomattavasti aikaa verrattuna kahden vaihtoehdon tutkimiseen. Seuraavaksi käsiteltävien osakokeiden avulla voidaan saada tehtyä kolmen vaihtoehdon tutkiminen vähemmällä koemäärällä. [22, 23]

### 3.2.2 Osakoe (Fractional factorial experiment)

Täydellinen kaikkien parametrien eri vaihtoehtojen keskinäisten vaikutusten tutkiminen voidaan vaihtoehtoisesti jättää pois, jolloin tutkitaan osakokeella (*fractional factorial experiment*) kokemuksen perusteella merkittävimmiksi muodostuneet vaikuttavat tekijät. Osakokeen sisältämien parametriyhdistelmien ideana on tutkia sekä yksittäisten parametrien vaikutusta lopputuotteeseen, että kahden parametrin välisiä vaikutuksia toisiinsa ja sitä kautta lopputuotteeseen. Tällöin kolmen tai useamman parametrin yhteisvaikutus lopputuotteeseen jätetään tutkimatta. Niiden voidaan usein kuitenkin ymmärtää peittyvän yksittäisten parametrien ja kahden parametrin keskinäisten vaikutusten seurauksena, sillä nämä ovat vaikutuksista voimakkaimmat.

Näiden edellä kuvattujen parametriyhdistelmien tai yksittäisten parametrien lisäksi myös parametrien ja niiden yhdistelmien yhteiset vaikutukset lopulliseen tuotteeseen ovat mahdollisia. Tätä vuorovaikutusta kuvataan termillä sulautuminen (*confounding*). Esimerkiksi kolmen parametrin yhdistelmä voi vaikuttaa yksittäisen parametrin kanssa yhdessä muuttaen tuotetta toisenlaiseksi, jolloin siis tämä parametri on sulautunut (*confounded*) kolmen parametrin yhteisvaikutuksen kanssa. Useimmissa tapauksissa jätetään huomiotta useiden tekijöiden yhteisvaikutusten sulautuminen toisten yhdistelmien kanssa, sillä näistä sulautumista aiheutuva vaikutus lopulliseen tuotteeseen on monissa tapauksissa todella pieni. [24]

Tarkasteltaessa kuuden tekijän vaikutusta tuotteeseen kahdella parametrivaihtoehdolla olisi täyden kokeen sisältämien yhdistelmien määrä 26 eli 64. Jos kuitenkin otetaan huomioon vain kuuden tekijän A, B, C, D, E ja F suorat vaikutukset, sekä kaikki näiden kahden yhdistelmät, saadaan erilaisia yhdistelmiä yhteensä 21 kappaletta. Suorat vaikutukset ovat siis A, B, C, D, E, F, ja näiden lisäksi kahden tekijän yhteisvaikutukset ovat AB, AC, AD, AE, AF, BC, BD, BE, BF, CD, CE, CF, DE, DF ja EF. Näiden vaikutusten tutkiminen voidaan siis tehdä likipitään kolmasosalla täyden koemäärän ko-



keista ja saada tärkeimmät vuorovaikutukset esille. Koska tutkimuksessa jätetään tarkoituksella pois vuorovaikutuksia, tulee tällaisen tutkimuksen suunnittelussa olla jo hyvät tai vähintään keskinkertaiset tiedot merkittävimmistä tutkittavista parametreista.

Kun on määritetty tärkeimmät parametrit tutkittavaksi, on olemassa neljä erilaista osakoemenetelmää, jotka toimivat hyvin yksittäisten parametrien suorien vaikutusten ja kahden parametrin yhteisvaikutuksen tutkimiseen. Nämä menetelmät esitellään taulukossa 3.1. Kukin osakoe on nimetty potenssimerkintöjä käyttäen luvun kaksi avulla, millä viitataan siihen, että käytetään parametrille kahta vaihtoehtoa, joita tutkitaan. On toki olemassa myös kolmen vaihtoehdon osakoemenetelmiä. Potenssina oleva vähennyslasku tarkoittaa matemaattisesti laskettuna kyseisen koesarjan kokeiden lukumäärää. Miinuslaskun jättäminen näkyviin viittaa osakokeen käyttöön selvennyksenä ja erotuksena täysistä koesarjoista. [24]

Näissä osakokeissa voidaan testata 4-16 tekijää käyttäen enimmillään 32 koetta ja yksittäisten tekijöiden vaikutukset ovat sulautuneet vain kolmen tai useamman tekijän yhteisvaikutuksiin. Edellä olevia kirjaimia käyttäen esimerkkinä parametri A on sulautunut parametriyhdistelmän ABC kanssa. Taulukkoon 3.1 on merkitty vain yksittäisten parametrien ja kahden parametrin yhdistelmien väliset sulautumiset keskenään ja tästä monimutkaisemmat sulautumiset on jätetty pois. [22, 24, 25]

**Taulukko 3.1.** Osakokeet yksittäisten parametrien ja kahden parametrin yhteisvaikutuksen tutkimiseen tilanteessa, jossa on jo kohtuulliset tiedot parametrien vaikutuksista. [24]

Koetyyppi	Parametrien määrä	Kokeiden määrä	Sulautuminen
2 4-1	4	8	2 tekijän yhteisvaikutus toisen 2 tekijän yhteisvaikutuksen kanssa
2 5-1	5	16	Ei ole
2 8-4	6, 7, 8	16	Sama kuin 2 4-1
2 16-11	9-16	32	Sama kuin 2 4-1

Jos tiedossa ei ole selkeitä tärkeimpiä tekijöitä, jotka vaikuttavat prosessiin, voidaan tutkia, mitkä tekijät ovat turhia ja rajata ne pois. Tämän jälkeen voidaan tutkia tärkeimmiksi todettujen parametrien ja niiden yhdistelmien merkityksiä tarkemmin. On olemassa kolme erilaista osakoemenetelmää turhien vaikutusten rajaamiseksi pois tilanteesta, jossa selkeät eniten vaikuttavat parametrit eivät ole tiedossa. Nämäkin osakokeet vaativat vain vähän kokeita, enimmillään 16 kappaletta. Tämän lisäksi näillä menetelmillä voidaan tutkia enimmillään 15 parametria ja mikäli kokeen koko huomataan riittämättömäksi, voidaan sitä yksinkertaisesti laajentaa vastaamaan edellä olleita taulukon 3.1 kokeita. Nämä menetelmät on listattu taulukossa 3.2 seuraavana. Huomattava ero kokeiden sulautumisessa on havaittavissa taulukon 3.1 koemenetelmiin. Tällöin voidaan siis sanoa, että tämän taulukon kokeet ovat huomattavasti epätarkempia tuloksissaan.

Sulautumisen ollessa yksittäisten parametrien ja kahden parametrin yhteisvaikutuksen välistä, pitää tehdä lisäkokeita, jotta nämä sulautumiset saadaan selvitettyä. Taulukossa 3.2 on myös merkitty vain yksittäisten tekijöiden ja kahden parametrin yhteisvaikutuksen sulautuminen. Tällöin voidaan erottaa sulautuneet parametrit toisistaan ja tulokset tarkentuvat. Kuitenkin parametrien suorat vaikutukset ja kahden parametrin yhteisvaikutus tuotteeseen toimii useimmiten tärkeimpänä vaikuttajana. [24]

**Taulukko 3.2.** Osakoetyypit tilanteeseen, jossa ei ole tarkkaa tietoa parametrien vaikutuksista lopulliseen tuotteeseen ja toisiinsa. [24]

Koetyyppi	Parametrien määrä	Kokeiden määrä	Sulautuminen
23–1	3	4	Yksittäinen parametri on sulautunut kahden parametrin yhteisvaikutuksen kanssa.
27–4	5, 6, 7,	8	Sama kuin 23–1
215–11	8–15	16	Sama kuin 23–1

Osakokeet perustuvat Pareton periaatteelle, jonka mukaan pieni osa parametreista vaikuttaa eniten tuloksiin. Osakokeiden käyttö tarkoittaa kuitenkin aina tiedon häviämistä parametrien sulautumisen takia. Häviävät tiedot voidaan saada selville vain tekemällä lisää osakokeita tai vaihtoehtoisesti edellä oleva kaikkien vaikutusten analyysi. Osakoemenetelmien heikkoutena on havaittu myös niiden alttius erityistekijöitä kohtaan, joita osakokeilla ei voida havaita. Nämä erityistekijät ovat siis kokeen parametrien ulkopuolisia häiriötekijöitä. Osakoemenetelmän heikkoutena on nähty myös kokeen taustalla olevan teoriapohjan ymmärtäminen, sillä se ei ole kovin helposti ymmärrettävä verrattuna täyden kokeen teoriaan. [24]

### 3.3 Taguchin menetelmä

Genichi Taguchin kehittämä ja hänen mukaansa nimetty menetelmä pyrkii parantamaan laadunhallintaa määrittämällä laskennallisia yhteyksiä erilaisten tekijöiden välillä. Menetelmän sisältämiä välineitä ovat häviöfunktiot (*loss function*), signaalin ja häiriön osuuden (*signal-to-noise ratio*) määrittäminen, ortogonaaliset matriisit ja varianssianalyysi. Menetelmän kuuluisimpia toteutustapoja ovat olleet Taguchin tekemät osittaiskokeet (*fractional factorial test*), joissa esimerkiksi seitsemää parametria tutkitaan vain kahdeksalla kokeella tai 15 parametria 16 kokeella. Jos seitsemän parametrin vaikutusta toisiinsa halutaan tutkia täyden koesarjan (*full-factorial test*) voimin, vaatii se 27 koetta, jos tutkittavilla parametreilla on kaksi eri vaihtoehtoa. Kaikkien vaikutusten testaamisessa listataan siis kaikki mahdolliset yhdistelmät näille tutkittaville ominaisuuksille.

Taguchin menetelmän yhdellä sovellutuksella voidaan saada kahdeksalla kokeella siis 128 kokeen tulos, mikä säästää aikaa ja vaivaa huomattavasti. Menetelmässä testa-

taan vain yksittäisten parametrien ja kahden parametrin yhteisvaikutuksia lopputuotteen. Taguchi teki tällaisen kokeen laattojen valmistuksen yhteydessä japanilaisen valmistajan tuotteilla ja tulokset löytyvät kirjallisuudesta [26, 27]. Seitsemän eri parametrin tutkimiseen vain kahdeksalla kokeella tarvitaan varma tieto siitä, että nämä parametrit ovat toisistaan riippumattomat. Tutkittavan prosessin tai tuotteen ominaisuudet järjestetään taulukkoon ja kullekin parametrille määrätään vaihtoehdot, joilla sen vaikutusta kokonaisuuteen tutkitaan. Parametrien valinta tulee tehdä huolella, jotta ne olisivat tarkasteltavalla alueella lineaarisia. Mikäli ominaisuudet ovat epälineaarisia, on hyvin mahdollista epäonnistua optimointitehtävässä. Käytettävänä voi olla myös Minitab-ohjelman kaltaisia tietokoneohjelmia, joissa on valmiina erilaiset Taguchin menetelmän ortogonaalimatriisit. [25, 26, 27]

Tutkittaviksi valittujen ominaisuuksien vaihtoehdoista tehdään ortogonaalinen matriisi tai taulukko, jossa ovat tilastollisesti toisistaan riippumattomat yhdistelmät eri ominaisuuksien vaihtoehdoille. Tällaisesta matriisista käytetään merkintätapaa

$$L_x(Y_z),$$

jossa L on merkki Taguchin menetelmän mukaisesta matriisista. Muuttujat x, y, ja z ovat järjestyksessä kokeiden lukumäärä eli matriisin rivien lukumäärä, yksittäisen parametrin vaihtoehtojen lukumäärä ja parametrien maksimimäärä. Tällöin siis  $L_8(2_7)$  tarkoittaa kahdeksan eri kokeen ja kahden parametrivaihtoehdon tutkimusta, jolla voidaan tutkia enimmillään seitsemää eri parametria. On mahdollista rajoittaa lähtötilanteen arvoja jättämällä pois joitakin yhdistelmiä jos tiedetään, ettei niitä voida toteuttaa. Tavoiteltava tulos prosessille tai tuotteelle voi olla mahdollisimman pieni, jolloin paras arvo on nolla. Toisaalta tavoite voi olla mahdollisimman suuri, jolloin ääretön tai 100 % on ideaali tulos. Näiden lisäksi kolmantena tavoitevaihtoehtona voi olla jokin tietty numeerinen arvo. Matriisin koko määräytyy tutkittavien parametrien vapausasteiden mukaan, jolloin vapausasteiden lisääntyessä mittausdatan tarve kasvaa. Vapausasteiden määrän kasvaessa tarvitaan enemmän mittausdataa, koska parametrien keskinäiset vaikutukset monimutkaistuvat. Vapausasteiden laskeminen voidaan suorittaa melko yksinkertaisesti muutaman säännön pohjalta: [25, 27]

- Yleinen keskiarvo vaatii yhden vapausasteen.
- Jokaiselle parametrille vapausasteiden lukumäärä on parametrin vaihtoehtojen lukumäärä vähennettynä yhdellä.
- Kahden parametrin keskinäisen vaikutuksen vapausaste määräytyy näiden parametrien vapausasteiden tulona. [25]

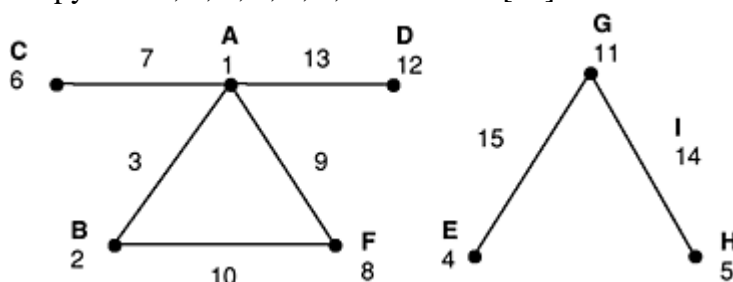
Tällä tavalla laskettuna kokonaisvapausasteiden lukumäärä muodostuu summana kaikista olemassa olevista vapausasteista. Kun vapausasteiden lukumäärä on saatu määritettyä, voidaan valita tarkoitukseen sopiva ortogonaalinen matriisi. Matriisin valinnassa tulee huomata, että siinä tulee olla enemmän kokeita, eli rivejä, kuin mikä on vapausasteiden lukumäärä. Viimeisenä tulee asettaa parametrit matriisiin seuraten parametrien keskinäisiä vaikutuksia esimerkiksi vuorovaikutustaulukon tai lineaarisen graafin avulla. Vuorovaikutustaulukossa on siis listattuna eri parametrien keskinäiset vaikutukset ja lineaarinen graafi selittää nämä samat tekijät graafisella tasolla. Esimerkkinä vuorovai-

kutustaulukosta L16 – matriisille on kuvan 3.1 listaus, jossa taulukon pysty- ja vaakariivit ovat parametreja, joiden vuorovaikutus toisiin parametreihin voidaan nähdä kulke-  
malla kunkin pylvään kohdalta tarkasteltavan parametrin kohdalle. Niinpä L16-  
matriisissa pylväät 1 ja 5 ovat yhteisvaikutukseltaan sulautuneet parametrin 4 kanssa ja  
esimerkiksi parametrit 8 ja 10 ovat samalla tavalla yhteisvaikutukseltaan sulautuneet  
parametrin 2 kanssa.

Column	Column														
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
1	(1)	3	2	5	4	7	6	9	8	11	10	13	12	13	14
2		(2)	1	6	7	4	5	10	11	8	9	14	15	12	13
3			(3)	7	6	5	4	11	10	9	8	15	14	13	12
4				(4)	1	2	3	12	13	14	15	8	9	10	11
5					(5)	3	2	13	12	15	14	9	8	11	10
6						(6)	1	14	15	12	13	10	11	8	9
7							(7)	15	14	13	12	11	10	9	8
8								(8)	1	2	3	4	5	6	7
9									(9)	3	2	5	4	7	6
10										(10)	1	6	7	4	5
11											(11)	7	6	5	4
12												(12)	1	2	3
13													(13)	3	2
14														(14)	1
15															(15)

**Kuva 3.1.** Vuorovaikutustaulukosta voidaan nähdä eri pylväiden vuorovaikutus toisiinsa, tämä esimerkitapaus on L16 – matriisille [25].

Lineaarinen graafi L16-ortogonaalimatriisille on esitetty kuvassa 3.2 alla. Jokainen parametri on esitetty isolla kirjaimella A-I ja parametreille tai niiden välisille vuorovaikutuksille tarkoitetut matriisin pylväät on merkitty numerolla joko suoraan parametrin kohdalle tai kahden parametrin välille. Parametri I on erillään koko graafista itsenäisenä tekijänä. L16-matriisilla voidaan tutkia yhteensä 15 eri vaikutusta kahdella tasolla, joista kuvan 3.2 lineaarisen graafin mukaan yksittäisen parametrin vaikutusta esittävät matriisin pylväät 1, 2, 4, 5, 6, 8, 11 sekä 12. [25]



**Kuva 3.2.** Lineaarinen graafi L16-ortogonaalimatriisille. Mustat pisteet kuvaavat yksittäisen parametrin vaikutusta. [25]

Loput matriisin pylväät vastaavat kahden parametrin vuorovaikutusta, jotka on kuvassa 3.2 merkitty numeroilla 3, 7, 9, 10, 13, 14 ja 15. Matriisi muodostetaan järjestämällä parametrien vaihtoehdot matriisiksi, kuten kuvassa 3.3 alla. Sekoittamalla arvojen järjestys saadaan luotua erilaiset yhdistelmät, joihin edellä esiteltyt lineaariset graafit ja vuorovaikutustaulukot perustuvat. [25]

Experiment no.	Columns														
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
2	1	1	1	1	1	1	1	2	2	2	2	2	2	2	2
3	1	1	1	2	2	2	2	1	1	1	1	2	2	2	2
4	1	1	1	2	2	2	2	2	2	2	2	1	1	1	1
5	1	2	2	1	1	2	2	1	1	2	2	1	1	2	2
6	1	2	2	1	1	2	2	2	2	1	1	2	2	1	1
7	1	2	2	2	2	1	1	1	1	2	2	2	2	1	1
8	1	2	2	2	2	1	1	2	2	1	1	1	1	2	2
9	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2
10	2	1	2	1	2	1	2	2	1	2	1	2	1	2	1
11	2	1	2	2	1	2	1	1	2	1	2	2	1	2	1
12	2	1	2	2	1	2	1	2	1	2	1	1	2	1	2
13	2	2	1	1	2	2	1	1	2	2	1	1	2	2	1
14	2	2	1	1	2	2	1	2	1	1	2	2	1	1	2
15	2	2	1	2	1	1	2	1	2	2	1	2	1	1	2
16	2	2	1	2	1	1	2	2	1	1	2	1	2	2	1

**Kuva 3.3.** Ortogonaalimatriisi, jossa parametrien tasot ovat 1 ja 2, joten sillä tutkitaan kahta parametrivaihtoehtoa [25].

Kuvan 3.3 matriisiin sijoitetaan lopulta vaihtoehtojen 1 ja 2 tilalle valitut kaksi vaihtoehtoa tutkittaville parametreille, jolloin koesuunnitelma on valmis. Muovien prosessoinnissa tällaisen koesuunnitelman pohjalta voidaan tehdä koeajo esimerkiksi ruiskuvalun parametrien tutkimiseksi. Koeajon jälkeen saataisiin koostettua tulokset, jotka esittävät tuotteen mittausarvojen vaihtelua parametrien muutosten suhteen. Taguchin menetelmän yhtenä merkittävimpänä ydinasiana on tulosten tulkinnassa käytettävä häviöfunktio (*loss function*), jolla tuotteen ominaisuuden poikkeamaa tavoitearvosta havainnollistetaan. Häviöfunktioilla on kolme muotoa, jotka on suunniteltu erilaisten tavoitteiden saavuttamiseen. Tavoitteena voi olla yksittäinen tarkka arvo, joka on selkeästi paras kaikista mahdollisuuksista. Tämän lisäksi voidaan tavoitella pienintä mahdollista, tai suurinta mahdollista arvoa, kuten edellä mainittiin. [25]

Häviöfunktion käyttö yhdistetään signaalin ja melun osuuksien määrittämiseen, jolloin saadaan selville, miten paljon tietyssä parametrien yhdistelmässä on mukana häiriötekijöitä sotkemassa ”signaalia” eli kuinka paljon tuloksesta on muodostunut varsinaisista määrittävistä tekijöistä ja kuinka paljon tulee ympäristön aiheuttamista häiriöistä. Signaalin ja häiriön osuus tulee luonnollisesti määrittää olemaan mahdollisimman suuri, jolloin varsinaiset prosessin muuttujat ovat suurin tekijä prosessin lopputuloksessa. Jos häiriötekijöiden määrä saadaan pieneksi, niin syntyvien tuotteiden ominaisuudet ovat helposti ennustettavissa. Samalla tämä vähentää variaation määrää lopullisten tuotteiden arvoissa, joka on toinen Taguchin menetelmän tavoitteista. Toisena tavoitteena on tuotteiden mittausarvojen jakauman siirtäminen tavoitearvon kohdalle, jolloin kaikista syntyvistä tuotteista suurin osa on juuri tavoitearvon kohdalla. [25]

### 3.4 Neuroverkot

Neuroverkkojen avulla voidaan luoda yhteyksiä erilaisten parametrien välille, ja myös epälineaaristen yhteyksien havaitsemisessa se on toimiva väline. Erilaisia neuroverkko-tyyppejä on useita ja tämän opinnäytetyön puitteissa tarkastellaan ”oppivia” verkkora-

kennelmia. Näitä oppivia ja myös ei-oppivia verkkomalleja voi rakentaa esimerkiksi Matlab – ohjelmistolla käyttäen ohjelman omaa työkalua verkonrakennuksessa [28]. Oppiva neuroverkko on tarpeen sulatyöstöprosessin hallitsemiseksi, koska jokainen prosessi on omanlaisensa kokonaisuus. Ei voida siis käyttää samaa verkkoa eri prosesseille ilman täyttä uudelleen koulutusta. Monissa tutkimuksissa on tutkittu muovien prosessoinnin parametrien ja lopputuotteen ominaisuuksien yhteyksiä neuroverkkojen avulla. Esimerkiksi auton hansikaslokeron ruiskuvaluprosessi saatiin jäähdytysajaltaan nopeutettua puoleen alkuperäisestä 20 sekunnin jäähdytysajasta samalla pienentäen kappaleen vääntymän arvoa noin 33 %. Absoluuttisesti mitattuna alkuperäinen vääntymä ennen optimointia oli 2,358 mm ja optimoinnin jälkeen 1,58 mm. Optimoinnin jälkeen tuote vastasi silti alkuperäisen tuotteen vaatimuksia. [28, 29, 30, 31]

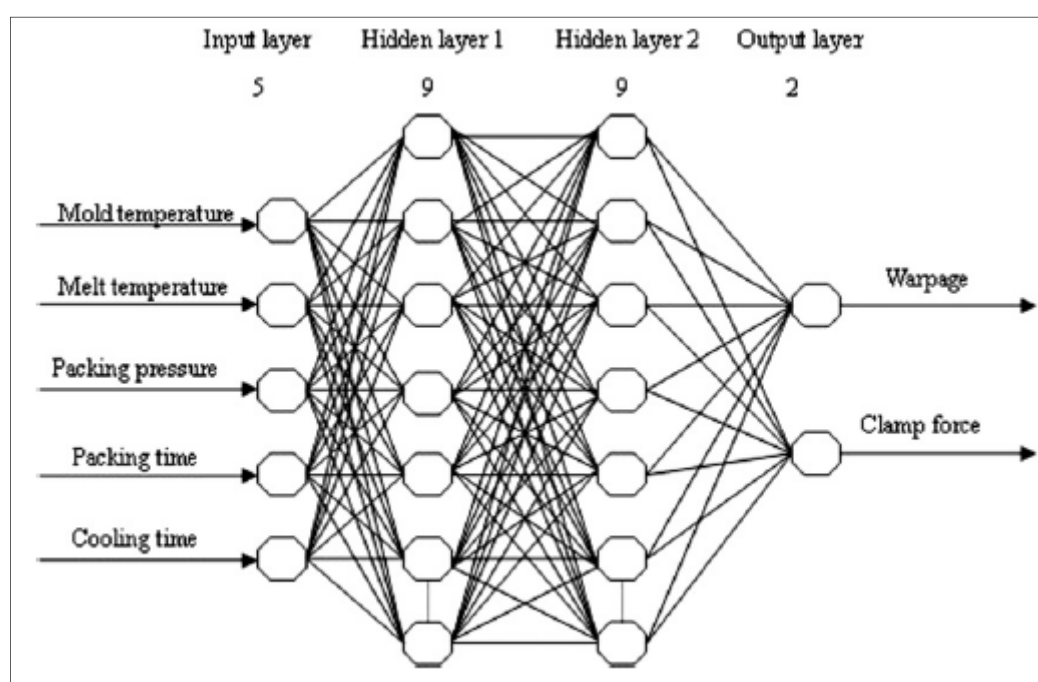
Aiemmin mainittu neuroverkon oppiminen tapahtuu, kun verkon sisään syötetään ensin tietoa todellisesta tapauksesta ja sen antamista tuloksista. Tätä vaihetta nimitetään verkon harjoittamiseksi. Tietojen syöttämisen aikana verkko rakentaa yhteyksiä ja erilaisia painotuksia datan avulla, jolloin verkon sisältämät yhteydet voimistuvat tai heikentyvät takaisinkytkennän (*back-propagation*) ansiosta. Sisään syötetään monia erilaisia koneparametrien yhdistelmiä, joiden lopputulokset ovat myös tiedossa. Verkolle opetetaan tällä tavalla erilaisten parametrien suorat ja yhteisvaikutukset toisten parametrien kanssa. Näitä erilaisia yhdistelmiä tarvitaan tyypillisesti satoja, jotta verkko muodostaa selkeät riippuvuudet eri parametrien suhteen. Esimerkiksi Sadeghi et. al. tutkivat tieteellisen laskimen kannen ruiskuvaluprosessia, jonka oppimiseen neuroverkko tarvitsi yhteensä 660 sisään syöttöä, jonka jälkeen se osasi ennustaa lopputuloksen. Lopulta riittävän harjoittamisen jälkeen verkko on valmis testattavaksi. Testin avulla halutaan luonnollisesti tarkastaa, että verkon ennustamat tulokset ovat riittävän lähellä prosessista oikeasti satavia tuloksia. Tämän jälkeen tietoa täytyy syöttää lisää, jos verkko ei vielä osaa ennustaa testin tuloksia. Mikäli verkko suoriutuu testistä, se voidaan ottaa käyttöön. [31, 32]

Prosessissa tapahtuviin muutoksiin voidaan reagoida neuroverkon uudelleen koulutuksella. Tällöin verkolle opetetaan uudet riippuvuudet uuden koesarjan tietojen avulla. Nämä tiedot muuttavat verkon yhteyksien painotuksia ja tätä kautta verkko koulutetaan uudestaan. Uusien yhteyksien ja painotuksien testaaminen uudelleen koulutuksen jälkeen on tarpeellista, jotta voidaan olla varmoja, että verkko osaa uudistuneen prosessin. On mahdollista tehdä useampia peräkkäisiä koulutuksia myös uudelleen koulutusvaiheessa. [33]

Neuroverkko koostuu keinotekoisista neuroneista, joista jokaiseen tulee useita yhteyksiä sisään ja signaalin prosessoinnin jälkeen ulos lähtee neuronin laskema signaali toisiin neuroneihin verkossa. Sisään tulevilla yhteyksillä on omat painokertoimensa, jotka vaikuttavat tulevan signaalin vahvuuteen. Kaikista neuroniin tulevista signaaleista lasketaan nettosignaali, jonka avulla voidaan edelleen laskea kyseisen neuronin aktivaation taso. Neuronin aktivaatiotaso toimii pohjana neuronin lähettämälle signaalille. Aktivaatiotaso sijoitetaan jälleen funktioon, joka laskee lopullisen uloslähtevän signaalin.

Tämä funktio siis viimeistelee neuronin lähettämän signaalin, joka lähtee verkossa eteenpäin kaikkiin neuronin kanssa yhteydessä oleviin neuroneihin. [32]

Edellä kuvattu yksittäinen neuronin liitetään useiden toisten neuronien kanssa yhteen muodostamaan kokonainen verkko. Tyypillisesti verkossa on neuronikerros tulevalle tiedolle ja neuronikerros lähtevälle tiedolle. Näiden väliin voidaan sijoittaa piilotettuja neuronikerroksia yksi tai useita. Kuvassa 3.4. nähdään Yin et. al. tutkimuksesta otettu kuva, jossa sisäänsyöttökerroksen muodostavat viisi neuronin, jotka siis käsittelevät verkkoon syötettävät parametrit. Koneparametreiksi valittiin kyseisessä tutkimuksessa muotin lämpötila, sulan lämpötila, jälkipaineen taso ja jälkipaineaika sekä viilennysaika. Verkon määrittämät muuttujat laskivat näistä arvoista vääntyilyn arvon, sekä tarvittavan sulkuvoiman. [30, 32]



**Kuva 3.4.** Neuroverkon rakenne. Numeroiden avulla ilmoitettuna rakenne olisi tässä tapauksessa 5-9-9-2. [30]

Nämä viisi neuronin muodostavat tiedon sisäänsyöttökerroksen, josta signaali etenee seuraavana oleviin piilotettuihin kerroksiin (*hidden layer*). Kuvan tapauksessa näkyviin on piirretty vain seitsemän neuronin kuvan yksinkertaistamiseksi, mutta tutkimuksessa käytössä oli yhdeksän neuronin kerrokset. Tämän voi havaita myös kunkin kerroksen alapuolelle listattujen numeroiden avulla. Näiden numeroiden pohjalta ilmaistuna kuvan 3.1 verkko on rakenteeltaan siis 5-9-9-2. Verkon koko voi vaihdella paljonkin, esimerkiksi suuresta verkosta 5-20-20-1 tai pienemmästä verkosta esimerkiksi käyvät 4-2-3 sekä 3-4-3 [28, 31, 34]. Tässä esimerkissä jokainen edeltävän kerroksen neuronin on kytköksissä jokaiseen seuraavan kerroksen neuronin, mutta tämä ei yleisesti ole pakollista. Tarvittavan neuronimäärän arviointi vaatii ymmärrystä, jotta saadaan riittävän suuri verkko ilman, että verkon suorituskky heikkenee liiallisen neuronimäärän seura-

uksena. Verkon muunneltavuus on kuitenkin merkittävä etu, sillä siitä ulos saatavien ennusteiden määrää ja ennusteen tarkkuutta voidaan säätää verkon koolla, kun menetelmän käytöstä on riittävästi kokemusta. [32]

Laadullisesti parempi tuote voidaan saada prosessoitua kokeilun ja erehdyksen menetelmällä, mutta tällöin kallista tuotantoaikaa ja resursseja käytetään yritykselle hyötyä tuottamattomaan työhön. Eri tutkimuksissa on löydetty mahdollisuuksia saada määritettyä esimerkiksi yleisesti kappaleen laatua, täyttymisaikaa, ruiskutuspainetta, vääntyilyä tai kutistumia ruiskuvalutuotteista erilaisilla neuroverkkomenetelmillä. Oppiva verkko on sopivan harjoittelun jälkeen valmis ratkaisemaan ongelmia, ja epälineaaristen sekä ajasta riippuvaisten ongelmien selvittämisessä neuroverkot ovat toimivia. [28, 31, 35]

Suurimmat ongelmat neuroverkkojen suhteen sijaitsevat niiden yleisessä luonteessa, koska ne ovat eräänlaisia ”mustia laatikoita”, joista tietoa tulee ulos. Harjoittelun jälkeen verkko on muodostanut oikeat suhteet eri yhteyksille, mutta ulkopuolelta tarkastellen nämä yhteydet jäävät piiloon. Ei siis saada tietoa prosessista, joka johtaa oikean tiedon muodostamiseen verkon saadessa optimointitehtävän. Eräänä ongelmana voidaan nähdä myös verkon koon rajaamisen, sillä riittävän suuri verkko on aivan välttämätön tiedon oikeaa prosessointia varten. Vain silloin verkko voi muodostaa riittävän monimutkaiset vaikutukset eri muuttujien välille. Toisaalta mahdollinen yliarviointi neuronien määrässä vaatii lisää prosessointiaikaa, kun tietoa käsitellään ”liian monissa” neuroneissa. Tällöin optimoinnin tulos ei parane merkittävästi, vaikka siihen käytettävä aika piteneekin. [35]

### 3.5 Geneettiset algoritmit

Nimensä mukaisesti biologiseen perinnöllisyyteen pohjautuvat geneettiset algoritmit voivat simuloida myös prosessoinnin arvoja muovitekniikassa. Niiden alkuperäinen idea on peräisin 1970-luvulta, jolloin John Henry Holland ensimmäisen kerran tutki algoritmien käyttöä yhdistettynä darwinilaiseen vahvimpien yksilöiden menestymiseen pohjautuvaan lisääntymisstrategiaan. Kuten luonnossakin vahvimpien ja sopivimpien yksilöiden suvunjatkaminen on todennäköisempää, myös tämän algoritmin toiminnassa annetaan erilaisille yksilöille erilaiset mahdollisuudet menestyä. Geneettisten algoritmien yhteydessä populaation koko ei kasva, vaan seuraava sukupolvi muodostuu edeltäjistään, jolloin laskentaan ei tarvita perättäisillä sukupolvilla enempää aikaa eikä populaatioiden koko laajene hallitsemattomasti. [35]

Muovitekniikassa geneettisiä algoritmeja tosin käytetään harvoin ainoana välineenä optimointitehtävää suoritettaessa, sillä parempi teho saavutetaan hybridimalleilla [2]. Näillä algoritmeilla on kuitenkin saavutettu jopa 51 % pienempi vääntyilyn arvo [36]. Algoritmeja niistä tekee kolmivaiheinen prosessi, jossa valinta, sekoittuminen ja mutaatio muuttavat populaatiota. Muuttuvassa populaatiossa tavoitellut piirteet alkavat domioida sukupolvea toiseen ja tällä tavalla optimointitilanne alkaa lähestyä päätöstä. Lähtökohtana on esimerkiksi täysin keksitty populaatio, josta löytyy tutkittavat ominaisuudet kaikille populaation jäsenille. Tällöin siis jokaisella populaation jäsenellä on



tietty arvo tutkittaville ominaisuuksille. Näitä ominaisuuksia kehitetään perättäisten sukupolvien aikana siten, että halutun kaltaiset ominaisuudet jäävät populaatioon ja muut ominaisuudet putoavat pois. Jotta tiedetään, mitä ominaisuuksia halutaan jäämään populaatioon, käytetään jokaiselle populaation jäsenelle vertailuarvoa, josta käytetään nimitystä fitness-luku. Tähän fitness-lukuun päädytään, kun on tutkittu populaatiossa olevan yksilön suoriutumista tavoitefunktion avulla. Tavoitefunktio (esittele tavoitefunktio) laskee nimensä mukaisesti funktion tulokset lähtöparametreista. Muovien prosessoinnin alueella tällainen tavoitefunktio kuvaisi siis esimerkiksi prosessoinnin tulosta. Geneettinen algoritmi siis optimoi prosessin parametrit, ja apuna käytettävä tavoitefunktio ilmaisee vektorimuotoisena tuloksena käytetyillä parametreilla syntyvän tuotteen mittoja, massaa tai vastaavia tavoitteena pidettäviä ominaisuuksia. Tavoitefunktion tulos yksinkertaistetaan yhdeksi skalaariksi, eli fitness-luvuksi. [35, 36, 37]

Perättäisiä sukupolvia luodaan edellisen sukupolven pohjalta suosimalla fitness-luvultaan sopivimpia jäseniä, ja mukaan otetaan myös satunnaisvaihtelu sekoittamalla näiden fitness-luvultaan sopivimpien jäsenien arvoja keskenään. Arvojen sekoittaminen tapahtuu vaihtamalla yksilöiden välillä ennalta määrättyllä tavalla, esimerkiksi yksi jäsenen parametri viidestä vaihdetaan toisen yksilön kanssa. On toki mahdollista vaihtaa useita arvoja jonkin määrätyn säännön pohjalta, mutta tähän tarvitaan pidempiä jäseniä, jotka sisältävät enemmän parametreja. Esimerkkinä kahdella valitulla yksilöllä voisi olla viisi parametria:

- A, B, C, D, E
- F, G, H, I, J

Näiden sekoittaminen voidaan tehdä esimerkiksi ensimmäisten tekijöiden (A-F) ja kahden viimeisenä olevan tekijän suhteen (D, E – I, J), jolloin saataisiin kaksi yksilöä:

- F, B, C, I, J
- A, G, H, D, E

Tässä siis käytetään kahta geneettisen algoritmin toiminnosta, jotka ovat valinta, sekoittuminen. Kolmantena toimintona olevan mutaation kautta muutetaan mielivaltaisesti yksittäisten jäsenten yksittäisiä arvoja vaihtamisen sijaan. Tämän jälkeen saadut yksilöt arvioitaisiin jälleen fitness-luvun suhteen ja iterointi alkaisi alusta. Näiden fitness-luvultaan sopivimpien yksilöiden mukana tulee toki mahdollisuus liian aikaisesta konvergoitumisesta kohti jotakin tiettyä paikallista maksimia. Tästä syystä tuloksia joissain tapauksissa skaalataan, jotta käytäisiin läpi koko ratkaisuvaryys. Näin edetään kunnes löydetään riittävän lähelle tarvittavaa fitness-lukua oleva jäsen populaatiosta. Tämä tavoiteltu fitness-luvun arvo voidaan asettaa mielivaltaisestikin, mutta usein taustalla on selvä tarve tietyn tarkkuuden tulokselle. Esimerkkiarvoina Ozcelik et. al. tutkimuksesta voidaan esittää viiden parametrin optimoinnin tilanteessa populaation kooksi 50 yksilöä, sekoittumisen nopeudeksi yhden jäsenen yhden arvon sekoittuminen jokaisesta sukupolven vaihdosta kohti ja mutaatioiden ilmenemiselle 0,1 mutaatiota jokaista yksilöä kohti yhdessä sukupolvessa. Tällaisessa tilanteessa tarvitaan 401 kappaletta sukupolvia optimin tuloksen löytämiseen. Ozcelik et. al. optimoivat pesukoneessa käytet-

tävän muoviosan ainoastaan vääntyilyn suhteen, joka väheni tutkittaessa 51 % alkuarvosta. [36, 38]

### 3.6 Päästöä simuloivat algoritmit

Optimointialgoritmien joukkoon kuuluvat myös päästöä simuloivat algoritmit, jotka on suunniteltu sekä jatkuvien että epäjatkuvien ongelmien ratkaisuun. Nimensä ne ovat saaneet metallimateriaalien päästämisen tapahtuvan materiaalin sisäisen rakenteen uudelleenjärjestäytymisen takia. Lämpötilan hidas lasku päästön aikana edesauttaa materiaalia järjestäytymään sisäisen energiatilan suhteen mahdollisimman alhaiseksi. Jos päästössä tehdään nopea viilennys rauhallisen muutoksen sijaan, on kyseessä metallin karkaisu, jolloin se jää metastabiiliin tilaan. Analogia päästöön piilee materiaalin päästämisen ja optimointitilanteen tavoitteessa, sillä kumpikin pyrkii parhaimpaan eli stabiileimpaan rakenteeseen, jolla joko materiaalin sisäinen energia tai optimoitavan prosessin tulos on paras mahdollinen. Päästön aikana materiaali käy läpi eri lämpötiloja, jotka voidaan optimoinnin puolella tulkita eri prosessointiparametrien yhdistelmiksi. [2, 39]

Päästöä simuloivat algoritmit perustuvat tavoitefunktion käyttämiseen. Edeltävää funktion arvoa verrataan uuteen, juuri laskettuun arvoon ja vaihdetaan uusi edeltäjänsä tilalle, mikäli arvo on lähempänä tavoitetta. Prosessin aluksi määritetään tarkkaan, millainen ongelma, ratkaisujen avaruus ja algoritmi on käytössä, koska näitä on olemassa erilaisiin tilanteisiin useita. Esimerkkinä algoritmista voidaan mainita Metropolis-algoritmi. Kyseisissä algoritmissa tutkitaan lämpötilan muuttuessa energiatilan muutosta ja hyväksytään matalin energiatila, joka lämpötilojen vaihtamisen jälkeen on havaittu. Lisäksi kyseisissä algoritmissa käytetään todennäköisyyslaskentaa. Mikäli energiatilan ero edeltävään on suurempi kuin nolla, lasketaan kyseiselle energiatilalle vielä todennäköisyys, jolla se korvaa edeltäjänsä. Tämä todennäköisyys saadaan lausekkeesta

$$P = e^{\left(\frac{E_i - E_j}{k_B T}\right)}, \quad (2)$$

jossa  $E_i$  ja  $E_j$  ovat energiatilojen arvot,  $T$  on käytetty lämpötila ja  $k_B$  on Boltzmannin vakio. Lisäksi määritetään viilennyksen aikataulu, jonka mukaan alkulämpötila ja sen lasku tapahtuvat. Lämpötilan laskemisessa vähitellen pienenevä arvo saadaan aikaan käyttämällä vakiota, joka on pienempi kuin yksi. Tällä tavalla kierroksen numeron  $c_k$  kertominen alle yhden olevalla vakiolla  $\alpha$  tuo pieneneviä arvoja:

$$c_{k+1} = \alpha \cdot c_k, k = 1, 2, \dots \quad (3)$$

On myös mahdollista käyttää polynomista laskentaa lämpötilan laskemisessa. Sen periaate eroaa laskutapansa takia yllä olevasta suorasta kertoimen käytöstä, mutta peruseriaate on sama. Tarkempaa tietoa löytyy kirjallisuudesta [40, pp. 60-68]. Algoritmin aloitus tapahtuu siis alkulämpötilasta ja tätä lämpötilaa lasketaan matalammalle seuraavaa iterointia varten, aivan kuten päästössä tehdään. Alussa määritetään myös loppulämpötila, johon iterointi lopetetaan. Aloittamista varten tulee määrittää kaksi arvoa, toinen on aloittava ratkaisun arvo ja toinen tavoitteena oleva arvo. Päästöä simuloivien algoritmien avulla voidaan saada tuloksia monissa käytännön tilanteissa, joihin

ei ole olemassa valmiiksi luotuja algoritmeja. Näillä algoritmeilla saavutetaan hyviä tuloksia, mutta joissain tapauksissa laskenta-aika kasvaa suureksi. [2, 39, 40]

### 3.7 Partikkeliparveen perustuvat algoritmit

Erilaisten biologisten ja sosiaalisten käyttäytymismallien pohjalta on luotu algoritmi, joka matkii esimerkiksi lintuparven ruuanetsintää. Tällöin ympäristöön levittyvät parven jäsenet, yleisesti nimitettynä partikkelit, ilmoittavat toisilleen, mikäli ruokaa löytyy. Tältä pohjalta myös partikkeliparvi voi löytää optimointiongelman ratkaisun, kun sen jäsenet liikkuvat ympäristössä, eli ongelmatapauksen ratkaisujen muodostamassa moniulotteisessa avaruudessa. Nämä kaksi arvoa annetaan populaatiota luodessa usein sattumanvaraisesti. Partikkeleille annetaan aluksi paikat siten, että koko avaruus tulee katettua. Vastaavasti nopeudet määritetään sattumanvaraisesti välille  $[-v_{\max}, v_{\max}]$ . Populaation kooksi sopii hyvin esimerkiksi 10 - 50 partikkelia.

Aloitettaessa optimointia arvioidaan ensimmäiset partikkelit ja asetetaan jokaiselle paras arvo, joka on kyseisen sijainnin arvo. Tämän lisäksi jokaiseen partikkeliin tuodaan tieto koko parven parhaasta sijainnista. Tällä tavalla tieto hyvästä ratkaisusta leviää koko parveen ja se kokonaisuudessaan voi siirtyä kohti parempia ratkaisuja. Liikkumiseen liittyviä parametreja on yleisesti kaksi; nopeus ja paikka avaruudessa. Partikkelin seuraavassa sukupolvessa saama nopeuden arvo pohjautuu sen edelliseen nopeuden arvoon ja etäisyyteen parhaasta tähän asti partikkelin itsensä löytämästä paikasta ja koko parven löytämästä parhaasta paikasta. Uuden sijainnin perusteena käytetään laskettua uutta nopeuden arvoa. Partikkeleita liikutetaan siis kohti paikallista ja globaalia parasta havaittua ratkaisua, jotta niiden ympäristöstä voitaisiin löytää vielä parempia ratkaisuja. Partikkeleissa on mukana vektorimuotoinen tieto nykyisestä paikasta, nykyisestä nopeudesta ja parhaasta edellisestä paikasta, jokainen näistä omana vektorinaan.

Tuloksen tulkinnessa käytetään samantyyppistä fitness-funktiota kuin geneettisten algoritmien yhteydessä esiteltiin. Iterointia jatketaan, kunnes jokin tavoitearvo saavutetaan tai iterointien maksimimäärä saavutetaan. Tämän funktion pohjalta saadaan vertailuarvoiset tulokset eri partikkeleille. Käytössä olevien vektoreiden ulottuvuuksien ja optimaalisten ratkaisujen määrä voi olla kummassakin tapauksessa esimerkiksi 20 tai 100. Näillä vaihtoehdoilla tutkittuna on todettu, että partikkeliparvea käyttävät algoritmit toimivat geneettisiä algoritmeja paremmin. [2, 41, 42]

### 3.8 Mäen kiipeämistä matkiva algoritmi

Varsin yksinkertaiset, suoraan kohti ratkaisua kulkevat ”mäenkiipeämisalgoritmit”(hill climbing algorithm) voivat esittää esimerkiksi muovisulan virtauksen mallin erittäin hyvin [43]. Algoritmi etenee kokeillen joka puolelta ympäriltään saatavilla olevat ratkaisut. Näiden joukosta tulisi löytyä nykyiseen tilanteeseen verrattuna parempi sijainti ratkaisujen avaruudessa, jolloin paremman tuloksen löydyttyä siirretään tämä tulos uudeksi ratkaisuksi ja tutkitaan ympäristö jälleen parempaa tulosta etsien. Ratkaisujen

avaruuden tulisi olla siis verrattavissa mäen kiipeämiseen tavoitteena löytää huippu. Tällöin juututaan helposti paikallisen maksimin luo, jos ympärillä on vain tätä paikallista maksimia kohti vieviä reittejä. Kuten mäkeä kiivetessä kun lakea ei ole näkyvissä, voi olla hankala päästä korkeimmalle huipulle, jos useita rinteitä on näkyvissä ympärillä. Tämä algoritmityyppi ei talleta mitään tietoa menneisyydestä, joten se vain kulkee kohti parempaa tulosta kunnes ratkaisu löytyy. Samoin se valitsee ympäristöstään aina parhaimman ratkaisun ja siirtyy sen luo. Ratkaisun löydyttyä ei myöskään voida tietää tuloksen globaaliutta ilman lopullista testausta. [2, 43]

Rajoitetuissa tapauksissa tällainen suoraan optimia kohti kulkeva algoritmi on toimiva. Ratkaistavissa olevasta ongelmasta pitäisi pystyä toteamaan, että mahdollisten ratkaisujen avaruudessa kaikki parempaan suuntaan vievät ratkaisut vievät optimitilannetta kohti. Jos ongelman ratkaisu on täysin tuntematon, tai ratkaisujen muodostama avaruus on epätasainen, ei kannata käyttää tällaista yksinkertaista välinettä ratkaisussa. Muovisulan muottivirtauksen kuvaamisessa se toimii kuitenkin hyvin, koska muotissa muovi virtaa pienimmän paineen suuntaan suurimmalla nopeudella ja virtauksen nopeus tai paineen arvo on jokaiseen suuntaan tasaisesti pienenevä. Tällöin mistä tahansa kohdasta virtausta lähdettäessä voidaan löytää suurin nopeuden tai paineen arvo muotissa.

### 3.9 Eri menetelmien yhdistelmät

Yhdistelemällä eri menetelmien ominaisuuksia on mahdollista saada selvästi parempia tuloksia optimoinnissa. Yksittäisten menetelmien sisältämiä ongelmia voidaan peittää käyttämällä hybridimalleja, jotka pohjautuvat moneen menetelmään. Erilaisten menetelmien yhdistelmiä voidaan itse rakentaa tietokoneen laskettavaksi, mutta myös kaupalliset ohjelmistot pohjaavat erilaisten menetelmien ominaisuuksien yhdistelemiseen. Simulointi- ja optimointiohjelmistot sisältävätkin erilaisten menetelmien osia mahdollisimman tarkan tuloksen saavuttamiseksi. Kaupallisen sovelluksen käyttämiseen tarvittavat tiedot ovat suppeammat verrattuna itse luotujen mallien käyttämiseen. Erilaisten yhdisteltyjen optimointimallien rakentaminen itse on huomattavasti työläämpää verrattuna tietokoneohjelman ostamiseen.

#### 3.9.1 Neuroverkon ja geneettisen algoritmin yhteiskäyttö

Neuroverkon yhdistäminen geneettisen algoritmin kanssa on mahdollista tehdä siten, että geneettisen algoritmin muodostamia sukupolvia tutkitaan neuroverkon avulla. Tällöin neuroverkko ottaa tavoitefunktion paikan geneettisen algoritmin sisällä ja tulkitsee sukupolven yksilöiden ominaisuudet. Seuraava sukupolvi muodostetaan kuten geneettisten algoritmien yhteydessä yleisesti, eli sekoittamalla parhaat *fitness*-luvut omaavia populaation jäseniä keskenään. Neuroverkon käyttäminen osana tällaista rakennetta tuo mukanaan mahdollisuuden kehittää tuloksia ajan myötä neuroverkon oppimisen kautta. [30, 36]

Tutkimustuloksena tällaiselle neuroverkon ja geneettisen algoritmin yhdistelmälle on saatu esimerkiksi pienenennettyä vaihtelua kutistumisissa, jolloin tuotteiden laatu on

siis saatu tasaisemmaksi ja siten lähemmäs kohti haluttua. Tarkempi toleranssien hallinta on luonnollisesti tarpeen, jos halutaan tehostaa materiaalien käyttöä ja tuotannon toimintaa [44]. Myös vääntyilyn vähentäminen on onnistunut käyttäen yhdistettyä neuroverkkoa ja geneettistä algoritmia. Kurtaran et. al. tutkimuksessa lampun kotelon optimoinnissa 30 eri mittauspistettä käytettiin vääntyilyn arvioinnissa ja näistä 19 mittauspisteessä vääntyilyn arvo saatiin laskemaan pienenemisen ollessa enimmillään noin 84 %. Ennen optimointia mitattu suurin vääntyilyn arvo oli 2,47 %, joka pieneni arvoon 1,32 %. Tutkimuksessa pyrittiin vähentämään vääntyilyä optimoimalla prosessiparametreina muotin ja sulan lämpötila, jälkipaineen taso sekä jälkipaineaika ja viilennysaika [45]. Vastaavalla tavalla optimoitavaksi kohteeksi voidaan valita myös sulkuvoima ja vääntyily, kuten Fei et. al. tekivät omassa tutkimuksessaan tarkastellessaan laskimen kannen prosessointia. [30].

## 4 TIETOKONEOHJELMISTOJEN TARJOAMAT MAHDOLLISUUDET

Muovien prosessoinnin kehitys viime vuosikymmeninä on tapahtunut pitkälti tietokoneiden laskentakyvyn mukana. Ensimmäiset simulointiohjelmat olivat kaksiulotteisia kappaleita laskevia ohjelmia, joiden laskentamahdollisuudet rajoittuivat levy-, liuska-, tai putkimuotoihin. Näitä ohjelmia seurasivat 2,5D-mallit, jotka tekivät numeerisen laskennan kappaleiden keskitasossa kappaleen sisällä. Tämän päivän laskenta tehdään jo 3D-mallilla, joka perustuu tilavuuden ja pintaan tehtävän verkotuksen käyttöön. Nykyään myös monien sulatyöstöprosessien tietojen käsittely ja samanaikainen ohjaaminen tietojen pohjalta on jo mahdollista prosessin ollessa käynnissä. Tulevaisuuden tavoitteena olisi itseohjautuvuuden lisääminen prosessiin esimerkiksi oppivan ohjelman muodossa. Jo nyt voidaan tutkia ja myös optimoida muovin prosessointia tietokoneen simulointiohjelman luoman datan avulla. Joissain yhteyksissä on saatu hyviä tuloksia tutkitessa neuroverkon ja geneettisen algoritmin muodostamalla hybridimallilla saatuja tuloksia ainoastaan simulointiohjelmalla [30, 45]. Tällaisessa vaihtoehdossa ajetaan simulointiohjelmassa erilaisilla ja tarvittavilla parametrijohdistelmilla prosessi läpi, jonka jälkeen optimointi suoritetaan sopivalla menetelmällä erikseen. [3, 29, 30, 46, 47]

### 4.1 Ohjelmistojen nykytilanne

Markkinoilla on useita muovien prosessointia mallintavia ja simuloivia ohjelmia. Nämä voidaan jaotella esimerkiksi sen mukaan, miten tarkkaa simulointia ne suorittavat. Jotkin ohjelmat vaativat tarkat tiedot materiaalista ja sen reologisista ominaisuuksista, jolloin ne tekevät laskelmat erilaisten matemaattisten mallien pohjalta. Lisäksi tarvitaan CAD-malli tekeillä olevasta kappaleesta. Tätä syvällisempää lähestymistapaa on kutsuttu ”kovaksi laskennaksi”, englannin kielen *hard computing* mukaan. Kovan laskennan tyypillinen ominaisuus on numeerisen laskennan suuri määrä ja sitä kautta prosessointiajan pituus. Toiset ohjelmat taas rakentavat yhteydet ilman tietoa materiaalista tai prosessista. Nämä ohjelmat luottavat käyttäjän mittausdataan ja rakentavat mallin käytettyjen parametrien ja saatujen tulosten välille. Tämän laskentatavan nimitys on pehmeä laskenta (*soft computing*) edellä olevan kovan laskennan eräänlaisena vastakohtana. Pehmeä laskenta nojaa edellisen kappaleen erilaisiin optimointitekniikoihin ja niiden avulla prosessointiarvojen ja tuoteominaisuuksien välille rakennettuihin malleihin. [48]

#### 4.1.1 Optimointiohjelmisto Stasa QC

Stasa QC on Kistler-yhtiön ohjelma muovien sulatyöstöprosessien optimointia varten. Sitä vastaavia ohjelmia on vähän, mutta perusteellisempia simulointiohjelmia on olemassa useita. Ennen Stasa QC -ohjelman tulemistä markkinoille useilla tahoilla oli käytössä Minitab -niminen ohjelma, joka on tilastotieteen pohjalta toimiva ohjelma. Stasa QC -ohjelmassa ei tehdä muovien prosessoinnin suhteen mitään, vaan tilastollisesti erilaisilla koesuunnittelumenetelmillä ja neuroverkkojen käytöllä mallinnetaan tuotannon toimivuutta ja haetaan optimitulosta tuotantotilastojen avulla. [49]

Stasa QC – ohjelman lähtötilanteen oletuksena on, että käytetty materiaali, muotti ja kone ovat aina samoja. Tällöin näiden vaihtuessa tai muuttuessa tulee tehdä uusi optimointi prosessille. Kun tuote ja muotti ruiskuvalussa on jo suunniteltu ja tuotanto käynnissä, voidaan ohjelman avulla tehdä kyseisen prosessin optimointi valmistamalla tuotteita prosessissa erilaisilla ajoarvoilla. Ohjelma antaa suosituksen tarvittavien ominaisuuksien saavuttamiseksi ja sen perusteella voidaan mahdollisesti saavuttaa nopeampi tai energiatehokkaampi prosessi. Stasa QC on yksinkertaisempi ja halvempi ohjelma verrattuna monimutkaisemmin toimiviin simulointiohjelmistoihin, sillä se on optimointiohjelma eikä varsinaisesti simuloi prosessia mitenkään. Se perustaa ennusteensa käyttäjän toimittaman datan, itsestään rakentuvien neuroverkkojen käytön ja koesuunnittelun metodien varaan. Käyttäjän määrittämien koneparametrien ylä- ja alarajojen perusteella ohjelma muodostaa koesarjan, jossa on erilaisia yhdistelmiä käyttäjän antamista koneparametreista. Käyttäjän tulisi tietää, millaisilla prosessiparametrialueilla kyseistä tuotetta voidaan valmistaa. Ohjelmalla voidaan optimoida käytännössä mikä tahansa prosessi, jonka ohjaamiseen on olemassa mitattavia parametreja ja jonka tuotteelle pystytään määrittämään toleranssein rajoitettavat tuoteominaisuudet. Nämä tuoteominaisuudet voivat olla myös täysin subjektiivisia. Tällöin voidaan määrätä laatuparametrien vaihtoehdot esimerkiksi olemaan ”hyvä”, ”huono” ja ”hyvin huono”. Mittaajana toimivan henkilön on tällaisessa tapauksessa tehtävä päätös subjektiivisesti arvioidessaan tuotteiden ulkoasua.

Kun ohjelman määräämä koesarja ajetaan läpi, tulee ajo tehdä vakautuneella prosessilla, jotta koneparametrien vaikutukset tulevat oikealla tavalla esille kunkin tuoteominaisuuden suhteen. Koesarja määräytyy ohjelman sisältämien koesuunnittelun periaatteiden mukaisesti. Nämä periaatteet eivät tunne muovien prosessointilaitteistoa, joten koesarjan sisältämät ominaisuusyhdistelmät tulee tarkistaa ennen koeajoa. Tällä välteetään laitteiston hajoaminen väärin parametriyhdistelmien seurauksena. Koeajon toteuttaminen voidaan tehdä vaihdellen koesarjan rivejä keskenään, jos esimerkiksi koeajon suorittaminen tietyssä järjestyksessä tuottaa nopeamman tai muulla tavoin helpommin toteutettavan ajon. Esimerkiksi ruiskuvaltaessa muotin lämpötilan nostaminen ja laskeaminen kesken kokeen on hitaampaa, kuin muotin lämpötilan pelkkä nostaminen. Tällä säästetään aikaa eikä sillä ole vaikutusta tuloksiin. Kunhan prosessi vakioituu aina parametrien vaihtamisen jälkeen, ennen kuin varsinaisten koekappaleiden prosessointi aloitetaan.

Koeajon jälkeen mitataan tai arvioidaan haluttujen ominaisuuksien tulokset ja syötetään ne ohjelmaan. Tämän jälkeen ohjelma optimoi prosessin vaadittujen ominaisuuksien suhteen, ja saadaan tietää ohjelman ehdotus tavoitearvojen saavuttamiseksi. Jos prosessissa on suurta vikaa, voi olla että ohjelma ilmoittaa, ettei käyttäjän parametrien yhdistelmällä voida tehdä halutunlaisia tuotteita. Tällaisessa tapauksessa pitäisi löytää uusi koneparametrien alue ja testata kyseisellä alueella tuoteominaisuudet uudelleen. Lähtökohtaisesti kuitenkin tulisi olla jo ennen koeajoa tiedossa selkeä parametrien alue, jolla voidaan saada edes jonkinlainen tuote aikaiseksi. Tällöin ohjelma etsii tuolta alueelta optimiyhdistelmän eri parametreista. Mikäli käytetyn prosessointialueen sisältä ei löydy ohjelman mielestä löydy sopivaa prosessointiarvojen yhdistelmää, ohjelma esittää sellaista alueen ulkopuolelta.

Tulokset esitetään graafisesti ja prosessointiparametreja voidaan muuttaa suoraan ohjelman sisällä, jolloin ohjelma esittää ennusteensa kyseisille parametreille. Jos mennään tutkitun alueen ulkopuolelle, alkaa ohjelman tietojen ekstrapolointi, jolloin ennusteen varmuus laskee merkittävästi. Kokeen rajojen sisäpuolella ennusteen toimivuus on suurimmillaan, sillä siltä alueelta on tarkkaa mittaustietoa. Myös eri parametrien vaikutus esitetään visuaalisesti palkkidiagrammilla, jolloin on yksinkertaista nähdä selkeästi tietyn tuotteen ominaisuuden taustavaikuttajat. Valittaessa tuoteominaisuus tarkasteluun, tulevat näkyviin eri prosessointiparametrien prosentuaalinen osuus kyseiseen tuoteominaisuuteen. Tämän lisäksi voidaan tarkastella luodun mallin toimivuutta suhteessa mittaustuloksiin kullekin tuoteominaisuudelle erikseen. Tämä on mahdollista ohjelman antaman determinaatiodikertoimen ( $R$ -neliö,  $R$ -squared) ansiosta. Sen arvon ollessa yli 90 % voidaan olla varmoja, että ohjelman luoma ennuste tulee olemaan lähellä todellista tuotteen ominaisuutta. On toki mahdollista, että mittaustulokset ovat todella lähellä toisiaan, jolloin ohjelman ilmoittamat keskimääräinen absoluuttinen virhe ja suurin absoluuttinen virhe ovat avainasemassa tarkasteltaessa ennusteen ja todellisten tulosten välistä korrelaatiota. Kun ohjelma on ajettu optimoidulla tuloksella, kannattaa tulokset luonnollisesti todentaa ajamalla optimoitu tuote ja mittaamalla tulokset.

#### 4.1.2 Simulointiohjelmistot

Enemmän materiaaliin ja sen ominaisuuksiin sekä tuote- ja muottisuunnitteluun painotuvia ohjelmia ovat esimerkiksi MoldFlow, CadMold ja Moldex 3D. Myös eri CAD-ohjelmistoihin on saatavissa lisäosana muovien prosessoinnin työkalu. Esimerkiksi Solidworks CAD-ohjelmaan liitettävä Plastic processing – lisäosa tuo mukanaan mahdollisuuden mallintaa muovisulan virtausta ja tutkia muotin täyttymistä. Ensin voidaan tehdä muotti ja sen perusteella tuote, joka prosessoidaan ohjelman avulla. Tällöin muovituotteen suunnittelussa voidaan välttää kalliit virheet tuotteen tai muotin suunnittelussa. Koska tuote myös suunnitellaan samalla ohjelmistolla, ovat yhteensopivuusongelmat vältettävissä ja erilaiset muutokset nopeasti tehtävissä ja testattavissa. Lisäksi ainakin Solidworks -ohjelmiston edellä mainittu lisäosa osaa ehdottaa parannuksia muotin täyttöpisteeksi, jos muotin täyttäminen simuloinnin mukaan ei ole riittävää. [50]



Moldex 3D – ohjelmisto perustuu viskositeettitietoihin ja prosessin mallintamiseen matemaattisilla kaavoilla. Tällöin siis Moldex 3D mallintaa sulan muovin virtausta muotissa ja sitä voidaan myös tarkastella laskennan valmistuttua. Ohjelman suorittama ”kova laskenta” nojaa siis täysin viskositeettimalleihin, joita ohjelman sisään on ohjelmoitu. Viskositeettimallien lisäksi tulee luonnollisesti olla valettavasta kappaleesta tehty CAD-malli. Valettava kappale voidaan tuoda jostakin CAD-ohjelmasta sisään tai itse Moldex 3D -ohjelmaa voidaan käyttää CAD-ohjelman sisällä. Kun kappale on tuotu sisälle ohjelmaan, se verkotetaan kolmioelementeillä ja tehdään kappaleen valamisessa käytettävä muotti. Tämän jälkeen valitaan ruiskutuspuiste ja muottiin tehdään viilennyskanavistot.

## 4.2 Ohjelmiston käytön kustannukset

Hankintakustannuksen ja vuosittaisen lisenssimaksun lisäksi ohjelmistosta ja sen käytöstä syntyy erilaisia kuluja. Tarvitaan työntekijä ylläpitämään ohjelmistoa ja päivittämään sitä, mikäli käytössä ei ole yrityksen sisäistä tukihenkilöstöä. Myös varsinainen tietokonelaitteisto vaatii päivitystä muutaman vuoden välein. Työntekijöiden koulutus ohjelman käyttämiseen vaatii työaikaa, mutta koulutuksen loputtua voidaan olettaa, että esimerkiksi ongelmatilanteessa ratkaisuun kuluva aika lyhenee verrattaessa aikaan ennen ohjelman käyttöä. Jos oletetaan, että ongelmatilanne ratkaistaan kokeilun ja erehdyksen menetelmällä, on ymmärrettävää, että prosessin hyvin simuloiva ohjelmisto voi nopeuttaa ratkaisun löytymistä. Tällöin aikaa säästyy verrattuna toimintaan ennen ohjelman käyttöä, koska prosessia operoiva henkilö voi käyttää työaikansa simuloimiseen.

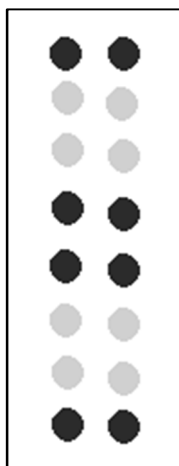
Tässä työssä tutkittavana oleva Stasa QC – optimointiohjelma kustantaa noin 9000 euroa käyttöönoton yhteydessä lisenssimaksuna, jonka jälkeen vuosittainen päivitysmaksu on vapaaehtoinen. Päivitysmaksun suuruus on 1500 euroa. Ohjelma toimii vuosia ilman erillistä päivittämistä ja uusimista. Vuosittaisten päivitysten mukana käytettävyyks voi parantua ja neuroverkon rakentumiseen saattaa tulla parempia algoritmeja käyttöön, joten ajoittainen päivittäminen tuo myös lisäarvoa. Mikäli käytössä on myös Kistler-yhtiön instrumentointilaitteisto, voidaan Stasa QC liittää tulevaisuudessa mukaan saman yhtiön CoMo – instrumentointipakettiin. [15]

## 5 KOKEELLINEN OSUUS

Kokeellisen osuuden tutkimuksissa pyritään selvittämään instrumentoinnin etuja ja Stasa QC – ohjelman toimivuutta eri prosesseissa. Instrumentointia tutkitaan termoplastisille elastomeereille suunnitellulla ruiskuvalumuotilla ja samalla pyritään selvittämään instrumentoinnin tuomia hyötyjä Stasa QC – ohjelman optimointiin. Optimointiohjelman tuloksia verrataan Taguchin menetelmän tuomaan optimointitulokseen, jolloin voidaan vertailla keskenään instrumentoitua ja instrumentoimatonta muottia sekä perinteisiin optimointivälineisiin kuuluvan Taguchin menetelmän ja uuden tietokoneohjelman toimivuutta.

### 5.1 Uponor Oy:n käynnissä olevan tuotantoprosessin optimointi Stasa QC – ohjelman avulla

Yhtenä mahdollisena käyttönä Stasa QC – ohjelmalle on jo käynnissä olevan tuotantoprosessin optimointi. Uponor Suomi Oy:n tiloissa kokeiltiin jo vuosia tuotannossa olleen tuotteen prosessin optimointia muottiin tehdyn pienen muutoksen jälkeen. Tarkoituksena oli optimoida hieman muuttunut prosessi vanhojen prosessointiarvojen avulla, sekä tutkia uudistetun tuotteen yhtymäsauman lujuutta. Oletuksena oli että uudistetulla muotilla tehtävä tuote voitaisiin prosessoida samoilla arvoilla kuin aiemmin tuotannossa olleet tuotteet oli prosessoitu. Tuotteen materiaalina käytetään polyeteeniä. Käytetyssä muotissa oli 16 pesää, joista 8 valittiin tarkasteluun ja niiden tuotteet mitattiin ja arvioitiin. Pienemmällä määrällä pesiä voitiin vähentää mittaamiseen kuluva aikaa. Näiden pesien sijainti on esitetty kuvassa 5.1 alla. Kahdeksan tummemmalla värillä näkyvää pesää ovat valitut pesät, joita merkitään järjestyksensä mukaisesti numeroilla 1, 2, 7, 8, 9, 10, 15, 16.



**Kuva 5.1.** Tutkittujen pesien sijainnit monipesämuotissa merkitty tummemmalla harmaalla.

Ruiskuvalamista varten tehtiin ruiskuvaluohjelma Stasa QC – ohjelman avulla. Tutkittaviksi ominaisuuksiksi valittiin lopulta pohdintojen jälkeen suuttimen lämpötila, ruiskutusaika, vastapaineen taso ja jälkipaineen taso sekä annostusnopeus. Näiden ominaisuuksien vaihtelua tutkittiin taulukon 5.1 ruiskuvaluohjelmalla. Tässä ohjelmassa nouseva massan lämpötila oli ajojärjestyksen määräävä tekijä, sillä suuttimen lämpötilan nostaminen ja laskeminen edes takaisin olisi vaatinut huomattavasti enemmän aikaa. Taulukosta 5.1 voidaan havaita, että ensimmäinen ja viimeinen koeajon koe samoilla parametreilla, kuten ohjelma aina haluaa tehtävän. Tällä tavalla saadaan määritettyä, onko prosessi ollut tasapainossa koeajon aikana, vai onko prosessin jokin osa ollut muuttuvassa tilassa. Muutos laitteistossa tai materiaalissa tarkoittaisi muutosta myös tuotteissa, jolloin ensimmäisen ja viimeisen kokeen tuotteet eroaisivat toisistaan.

**Taulukko 5.1.** Ruiskuvaluohjelma Stasa QC -ohjelmasta Uponor Oy:n -tuotteen yhtymäsauman testaamiseen.

Koe nro.	Suuttimen lämpötila [C°]	Ruiskutusaika [s]	Vastapaine [bar]	Jälkipaine [bar]	Annostusnopeus [%]
1	-15	1.7	-7	-8	-10
2	-15	1.7	-7	+18	-10
3	-15	3.3	-7	-8	+20
4	-15	3.3	+19	+18	+20
5	0	3.3	+6	+5	+5
6	0	2.5	+6	+5	+5
7	+15	1.7	-7	+15	+15
8	+15	1.7	+19	-8	+15
9	+15	3.3	+19	-8	-10
10	+15	3.3	+19	+18	-10
11	-15	1.7	-7	-8	-10

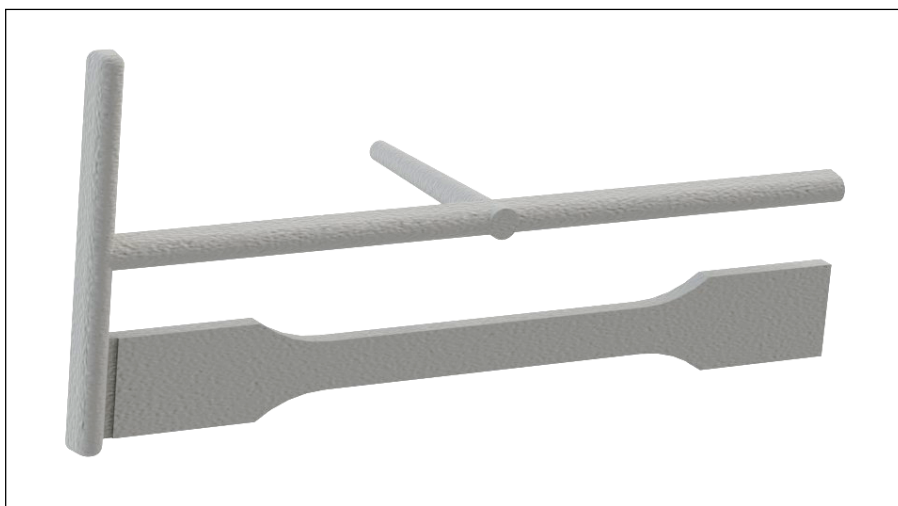
Ruiskuvaluohjelman lähtötasona pidettiin ennen muotin muutosta käytettyjen prosessointiarvojen lukemia, joista poikettiin yllä olevien yhdistelmien mukaisesti. Koeajo on Stasa QC – ohjelman avulla suunniteltu lukuun ottamatta riviä 5, joka tuli ylimääräisenä parametriyhdistelmänä kesken koeajon, koska ajojärjestyksessä tehtiin muutos ja kahta samaa koetta ei haluttu ajaa peräkkäin. Tällä saatiin siis lisää tietoa optimointiohjelmalle arvioitavaksi, mikä lisää ohjelman luoman mallin tarkkuutta. Eri parametrien vaihteluväli pyrittiin pitämään niin suurena kuin mahdollista ilman, että työkalut, materiaali ja laitteisto vaarantuvat. Alkuperäisesti suunnitelluista parametrien vaihteluväleistä jouduttiin kasvattamaan ruiskutusaikaa, koska ruiskuvalukoneen ruiskutukseen käyttämä aika oli lyhimmillään 1,7 sekuntia. Ennen muotin muutostyötä prosessin ruiskutuksenopeutena oli käytetty arvoa 2,1 sekuntia. Ohjelman antamaa parametrilistausta muutettiin koeajon jälkeen vastaamaan tarkkoja koneessa käytettyjä parametreja. Näin saatiin ohjelmalle tarkin tieto käytetyistä parametreista.

Ohjelman kannalta tärkeitä arvoja ovat tuotteen tavoitearvot sekä niihin liittyvät toleranssit. Nämä arvot käyttäjä itse määrää ohjelmaa käyttäessään. Mitattavista tuotteen ominaisuuksista rengasrakenteen sisähalkaisija mitattiin kahdella tavalla, koska tuotteen sovittaminen paikalleen vaatii eri suuret sovitukset rengasrakenteen päihin. Pinnanlaadun arviointiin käytettiin tässä tapauksessa mittaaajan subjektiiviseen arviointiin perustuvaa asteikkoa. Kylmälajennukselle sekä pinnanlaadulle arvo 0 on tavoiteltava tulos ja samalla ylätoleranssin arvo. Alatoleranssiksi hyväksytään pienet juoksujäljet pinnanlaadussa, koska ne eivät ole tuotteen kannalta ehdottoman merkittävä ominaisuus. Kylmälajennustestien tulos taas tulee olla nolla optimituotteella. Tämä testi perustuu tuotteen lopulliseen asennukseen ja sen yhteydessä tapahtuvaan laajennukseen, sillä jos tuote hajooa tai alkaa hajota kylmälajennuksessa, se saattaa hajota myös asennusvaiheessa. Kylmälajennuksen kaksi testiä tehdään laajentamalla tuote yhden kerran, jolloin voidaan arvioida tuotteen vastetta kahdessa kategoriassa. Toisella näistä testeistä arvioidaan tuotteen sisältämän yhtymäsauman kestävyyttä ja toisella arvioidaan reunasta alkavan repeämän suuruutta. Jos tuotteen yhtymäsauma ja reuna kestävät laajennuksen hyvin, tulee kyseisen tuotteen tulokseksi kumpaankin kategoriaan nolla. Yhteenvetona tutkitut ominaisuudet olivat siis vetokoetulos, korkeus, sisähalkaisija kummastakin päästä, pinnanlaatu sekä massa. Mittaukset suoritettiin vähintään 7 päivän kuluttua koe-kappaleiden ruiskuvalamisesta Uponor Suomi Oy:n testauslaitteistoilla Nastolassa. Koska kylmälajennustesti ja vetokoe ovat rikkovia testejä, niitä kumpaakin ei voitu tehdä kaikille näytteille. Tästä syystä kolmelle näytteelle tehtiin vetokoe ja kolmelle näytteelle kylmälajennustesti. Visuaalinen arviointi tehtiin kullekin koeajolle yhden pesän suhteen, sillä pesien kesken ei syntynyt eroja tuloksissa. Massa mitattiin ja sisähalkaisijamitat otettiin myös kolmesta näytteestä jokaisesta tutkitusta pesästä.

## 5.2 Stasa QC -ohjelman ja Taguchin menetelmän vertailu vetokoesauvan prosessoinnissa

Vetokoesauvan ruiskuvaluprosessi pyritään optimoimaan sekä Taguchin menetelmällä että Stasa QC – ohjelmalla, jolloin voidaan vertailla perinteisen tilastotieteen pohjalta tehtyä optimointia neuroverkkopohjaiseen menetelmään. Optimoitava kappale valetaan polypropeenista Borealis polymers – yhtiön valmistamasta PP BEC 5012 -materiaalista yksipesäisen vetokoesauvan muottiin. Ominaisuuksista pituus, paksuus, leveys, massa, vetokokeen tulos sekä visuaalisesti näkyvät purseen ja imun määrät mitataan ja määritetään. Polypropeeni valittiin työhön hankalan prosessoitavuutensa ja kutistumiensa vuoksi. Tyypillinen propeenin kutistuma on välillä 1,2 % - 2,5 %. Kutistuman arvon vaihtelu ruiskuvaluttaessa seuraa siitä, että muovisulan virtaussuunta vaikuttaa kutistuman arvoon. Kutistuma sulan virtaussuunnassa on merkittävämpi verrattuna sulan virtausta kohtisuoraan suuntaan. [51]

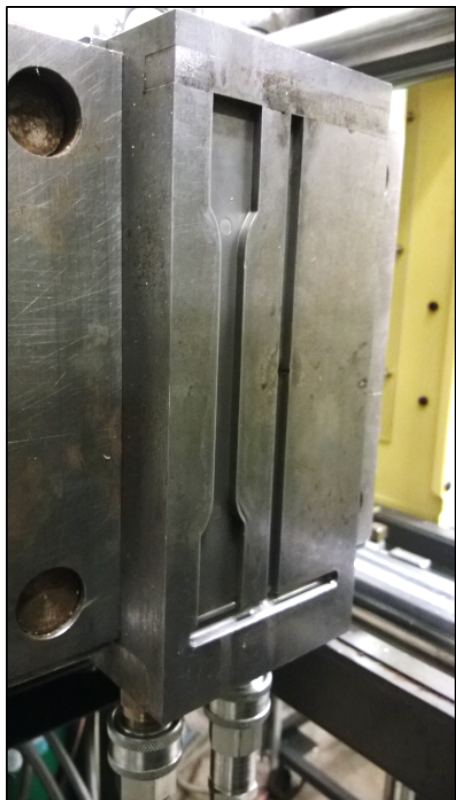
Kuvassa 5.2 nähtävä valukappale mitataan paksuuden ja leveyden suhteen keskeltä vetokoesauvan kavennettua osaa, jota siis käytetään myös veto-ominaisuuksien määrittämiseen massan mittaamisen jälkeen. Tuotteen massa punnitaan karoineen leikkaamisen aiheuttaman massavaihtelun välttämiseksi. Karaosan ja vetokoesauvan yhdistävä, kuvassa 5.2. vasemmassa alareunassa näkyvä ohennettu ”silta” voidaan leikata hieman eri tavoilla, jolloin vetokoesauvan massa vaihtelee huomattavasti enemmän verrattuna prosessoinnissa tuleviin massaeroihin. Tästä syystä tulee mitata tuotteen massa karoineen, jotta saadaan tietää nimenomaan prosessoinnin aiheuttamat massanvaihtelut. Massan mittaaminen on käytännöllinen tapa mitata prosessin sisäistä variaatiota ja kappaleiden laatua, koska vaihtelu massassa tarkoittaa vaihtelua ensisijaisesti kappaleen dimensioissa tiheyden vaihtelun sijaan [52].



**Kuva 5.2.** CAD-ohjelmasta otettu kuva vetokoesauvan valukappaleesta, jossa juoksu-kanava on mukana.

Vetokoesauvat ruiskuvaluttiin Tampereen teknillisen yliopiston polymeerilaboratoriossa käyttäen täyssähköistä Fanuc Roboshot Alfa c30 ruiskuvalukonetta. Tämän koneen suurin ruiskutuspaine on 2000 bar ja suurin sulkuvoima 300 kN. Suurimpana ruis-

kutusnopeutena on mahdollista käyttää 300 mm/s annostilavuuden ollessa suurimmillaan 19 kuutiosenttimetriä [53]. Käytössä ollut muotti on instrumentoimaton ja sen toinen puolikas voidaan nähdä seuraavana kuvassa 5.3.



**Kuva 5.3.** Vetokoesauvamuotti avonaisena. Ruiskutus tapahtuu ohuen osan keskeltä, jossa näkyy pyöreämpi kohta.

Kuvan 5.4 ruiskuvalusuunnitelmaan kuuluvista parametriyhdistelmistä valettiin kymmenen kappaletta koesauvoja, ja niiden ominaisuudet mitattiin ja arvioitiin. Ruiskuvalusuunnitelma on kuvakaappaus Stasa QC – ohjelman koesuunnittelun näkymästä. Tätä suunnitelmaa noudatettiin kunkin kokeen osalta täysin, mutta sillä erotuksella, että muotin lämpötilan nostaminen tehtiin yhtäjaksoisesti. Tällöin siis matalampien lämpötilojen valut tehtiin ensimmäisenä ja muotin lämpötilaa nostettiin pykälittäin korkeammalle seuraaviin valuihin. Ennen valamisen aloittamista ruiskuvalukone oli lämpenemässä noin tunnin verran, jona aikana sillä tehtiin kokeiluna vetokoesauvoja koesuunnittelun mukaisilla parametreilla. Tällä tavalla varmistettiin, että valitut parametrit tulevat toimimaan kokeessa ja että niillä saadaan vaihtelua tuotteisiin.

Design of Experiments (DoE)		Quality data						
Create DoE		Shots per setting	Import DoE	Export DoE	Print DoE	Delete DoE	Send DoE to CoMo Interface	Get DoE from CoMo Interface
Machine settings for DoE								
Experiment- No.	Shots per experiment	Comment	Ruiskutusnopeus [mm/s]	Jälkipaine [bar]	Jälkipaineaika [s]	Muotin (viilennysveden) lämpötila [Celsius]	Vaihtopiste [mm]	
1	10		130	800	6		40	13
2	10		100	500	4		30	10
3	10		100	500	4		50	10
4	10		100	1000	4		30	15
5	10		100	1000	7		50	15
6	10		150	500	4		50	15
7	10		150	500	7		30	15
8	10		150	1000	7		30	10
9	10		150	1000	7		50	10
10	10		130	800	6		40	13
11								

**Kuva 5.4.** Stasa QC – ohjelman koneparametrien perusteella tekemä ruiskuvaluohjelma.

Ominaisuuksien mittaus ja arviointi Stasa QC – ohjelmaa varten tehtiin kuvan 5.5 mukaan. Tästä kuvasta voidaan nähdä eri ominaisuuksien tavoitearvot (*target value*) ja toleranssirajat. Visuaaliseen arviointiin perustuvien imun ja purseen määrien arviointi tehtiin subjektiivisesti numeerisella asteikolla, jossa paras arvo on 3. Tällöin siis vailla pursetta ja/tai imujälkiä oleva tuote saa arvon 3 ja se on samalla optimituotteen tavoitearvo. Pituuden, paksuuden ja leveyden tavoitearvot laskettiin muotin mittaamisen jälkeen olettaen virtaussuuntaiseksi kutistumaksi 2,5 % ja virtauksen kohtisuoraan suuntaan 1,3 % perustuen lähdetietoihin [51]. Vetokokeen suorittamiseen käytettiin Instron 5967 yleisaineenkoestuskojetta ja vetokokeen mittaustulosten valmistuttua vertailuarvoksi valittiin kimmomoduli, koska sen vaihtelu oli laajinta tuloksissa. Tällainen valinta on mahdollista Stasa QC:n kanssa, koska mitä tahansa laatuominaisuuksia voidaan vaihtaa kesken optimointiprosessin ja siten optimoida prosessi uudestaan esimerkiksi uusilla toleranssiarvoilla.

Project

Machine parameters

Quality features

Data base

Machine settings optimization

Quality forecasting

Quality features

Add quality feature

Edit quality feature

Remove feature

Import

Export

Definition of quality features

✓ Online forecasting

✗ No online forecasting (change by double click)

Quality feature	Cavity	Type	Unit	Lower tolera...	Target ...	Upper tolera...	Attributes	
✓ Paksuus	1	continuous	mm	3.98	4.01	4.1	-	
✓ Leveys	1	continuous	mm	10	10.05	10.1	-	
✓ Massa	1	continuous	g	13.7	14	14.5	-	
✓ Imun määrä	1	attributive		2	3	3	1, 2, 3	
✓ Purseen määrä	1	attributive		2	3	3	1, 2, 3	
✓ Kimmomoduli	1	continuous	MPa	1100	1200	1300	-	
✓ Pituus	1	continuous	mm	166.7	166.85	167	-	

**Kuva 5.5.** Laatuparametrien listaus kuvakaappauksena Stasa QC - ohjelmasta.

Näiden laatuparametrien mittaamiseen kulunut aika oli noin kymmenen tuntia, jonka jälkeen tulosten syöttäminen ohjelmaan onnistui nopeasti käytössä olleen mittauspohjan avulla. Sen ansiosta tulokset voitiin ajaa suoraan sisään Stasa QC – ohjelmaan ja optimoida prosessi seuraavana vaiheena. Optimoinnin tulokset on esitetty tulosten käsittelyn yhteydessä kappaleessa kuusi.

### 5.2.1 Taguchin menetelmän koeajo

Taguchin menetelmän perusteella luotu koeajo toteutettiin samalla muotilla ja materiaalilla kuin Stasa QC – ohjelman kanssa. Koeajo pohjautuu  $L_9(3^4)$  - ortogonaalimatriisiin käyttöön. Kyseisessä matriisissa on parametreille kolme tasoa ja parametrien lukumäärä on neljä. Tarkempi erittely koneparametreista on nähtävissä taulukossa 5.2. Stasa QC – ohjelman kanssa toteutetusta koeajosta joudutaan jättämään yksi parametri pois, sillä ortogonaalisessa matriisissa ei ole tilaa viidelle parametrille. Pois jätettäväksi parametriksi valittiin muotin lämpötila. Jos olisi jätetty jokin toinen parametri pois tarkastelusta, olisi prosessista tullut hyvin erilainen verrattuna Stasa QC:lla toteutettuun koekeseen verrattuna. Kolmen tason parametrien vapausasteet ovat kaikki arvoltaan 2, jolloin koe sisältää yhteensä 18 vapausastetta. Eri parametrien yhteisvaikutuksia voitaisiin arvioida lisäämällä mukaan yhteisvaikutusta tutkivia pylväitä, mutta siinä tilanteessa myös koekappaleiden määrä tulisi nostaa suuremmaksi.

**Taulukko 5.2.** Taguchin menetelmän mukainen ruiskuvaluohjelma.

Koe	Ajojärjestys	Ruiskutusnopeus A [mm/s]	Jälkipaine B [bar]	Jälkipaineaika C [s]	Vaihtopiste D [mm]
1	6	100	500	3	10
2	3	100	750	5	12
3	2	100	1000	7	15
4	7	125	500	5	15
5	8	125	750	7	10
6	9	125	1000	3	12
7	4	150	500	7	12
8	1	150	750	5	15
9	5	150	1000	3	10

Taulukon 5.2 koe toteutettiin esitetyssä sekoitetussa ajojärjestyksessä, jotta parametrien vaihtelu tulisi näkyviin mahdollisimman selkeästi. Muotin lämpötila pidettiin edellä mainitusti vakiona käyttämällä kiertävän öljyn lämpötilana 40 celsiusastetta. Kymmenen vetokoesauvaa valettiin ja parametrien vaihdon yhteydessä prosessin stabilointiin käytettiin neljä iskua. Näiden iskujen aikana vetokoesauvojen ulkomuoto vakioitui, joten oletettiin, että parametrien vaikutus on vakioitunut myös. Näille näytteille tehtiin samat testit ja arvioinnit kuin Stasa QC - ohjelman pohjalta valetuille näytteille käyttäen samoja laitteita.

## 5.3 Instrumentoitu ruiskuvalumuotti termoelasteille

Tampereen teknillisen yliopiston polymeerilaboratoriossa suoritettiin vastavalmistuneen termoplastisten elastomeerien muotin käyttöönotto Stasa QC – ohjelmaa apuna käyttäen. Koska ei ollut kokemuksia tämän muotin käytöstä, oli tarve selvittää sopiva



prosessointialue muotin käyttöä varten. Muotti on instrumentoitu paine- ja lämpötilantureilla ja näiden antureiden tuomaa tietoa ottaa vastaan Kistler-yhtiön valmistama vahvistin, josta signaali viedään tietokoneelle. Kuvassa 5.6 nähtävä valukappale ruiskutetaan yhdestä pisteestä keskeltä kappaleen umpinaista päätä ja sen poistaminen keernan päältä tehdään paineilmalla työntämällä. Keernan jäähdytys on erillinen muotin jäähdytyksestä, joten kappaleiden valmistuksessa voidaan vaihdella muotin ja keernan lämpötiloja erikseen. Erilaisten parametrien vaihtelulla on tarkoitus löytää mahdollisimman vakaa tilanne, jossa tuote lähtee ehjänä keernan ympäriltä. Tuotteen erilaiset mekaaniset ominaisuudet eivät ole yhtä tärkeitä kuin tämä muotista irtoamisen varmistaminen. Tästä syystä irrotusvaiheen onnistumista tarkastellaan optimoinnissa.



**Kuva 5.6.** TPE-valukappale, jossa on mukana ruiskutuskanavasta jäänyt häntä. Ruiskutettaessa keskeltä kappaletta siihen ei synny kahden virtauksen kohtaamisesta kylmäsaumoja.

Tämän tuotteen osalta vaatimusprofiili keskittyy siis mekaanisten ominaisuuksien sijaan valmistusprosessin ympärille. Tällöin voidaan yksinkertaisesti pyrkiä optimoimaan valmistusprosessi nopeaksi ja materiaalitehokkaaksi sekä edellä mainitusti keskittyen kappaleen ehjään irrotukseen muotista. Muotin kuva on nähtävissä kuvassa 5.7, jossa muotin keerna on esillä ja ulkona muotin sisältä. Ruiskuvalut tehtiin Krauss-Maffei ruiskuvalukoneella. Se on hydraulinen kone, joka on tarkoitettu pienten kappaleiden valamiseen käyttäen suurimmillaan 500 kN sulkuvoimaa. Annostilavuus ruiskutettavalle kappaleelle on suurimmillaan 44 kuutiosenttimetriä. Valettavan kappaleen tilavuus on noin 30 kuutiosenttimetriä, joten koneen ruiskutuskyky on riittävä tälle kappaleelle.



**Kuva 5.7.** TPE-kappaleen valumuotin puolikas keerna ulostyönnettynä.

Kuvassa 5.7 on nähtävissä keernan lisäksi erikseen viilennetty keernaa ympäröivä muotin osa, jota etualalla näkyvät vesikiertoputket viilentävät. Keernan viilennysvesi kiertää kuvassa muotin yläpuolella nähtävissä mustissa vesiputkissa. Myös muotin ruiskutuspuolen jäähditys on vesikierrolla varustettu. Koeajon yhteydessä kävi ilmi, ettei instrumentoinnin tuoma tieto vielä tallentunutkaan tietokoneen muistiin, joten instrumentoinnin tiedot menetettiin, mutta siitä huolimatta prosessin optimointia kokeiltiin simuloiden uuden muotin käyttöönottoprosessia. Tällainen tilanne muotilla olikin, sillä muotilla oli ajettu joitain yksittäisiä tuotteita, eikä varsinaisista optimoiduista parametreista ollut tietoa.

Koeajon koneparametreiksi valittiin jälkipaine, ruiskutusnopeus ja vaihtopiste. Vain kolmen parametrin valinnalla voitiin vähentää koeajon mittaa ja pyrkiä optimoimaan tuote lähelle parasta mahdollista tulosta. Tällöin seuraavat ajot voivat parantaa tätä tulosta ja ottaa parametritiedoista suuntaa kohti lopullisesti optimoitua prosessia. Myöskin jäähdityksen eri menetelmien tutkiminen jätettiin seuraaviin tutkimuksiin. Tuotteesta tutkittaviksi ominaisuuksiksi valittiin massa, vajaatäyttöisyys, purseen määrä sekä tuotteen ehjä irtoaminen muotista. Yhteenveto näistä mittaus- ja koneparametreista voidaan nähdä kuvissa 5.8 ja 5.9 alla. Tuotetta oli ajettu aiemmin kokeiluna käyttäen ruiskutusnopeutena 60 mm/s, vaihtopisteenä 15 millimetriä ja jälkipaineena 400 baria. Näistä parametreista laajentamalla valittiin kuvan 5.8 parametrivälit.

Machine parameters						
<div> Add parameter Edit parameter Remove parameter Import Export </div>						
Machine parameters						
Machine parameter	Abbreviation	Unit	Smallest value	Largest value	Increment	
jälkipaine	JP	bar	300	500	50	
ruiskutusnopeus		mm/s	50	100	25	
vaihtopiste		mm	12	18	3	

**Kuva 5.8.** Koneparametrit TPE-kappaleelle kuvakaappauksena Stasa QC-ohjelmasta.

Kuvassa 5.8 näkyvät koneparametrien suurimmat ja pienimmät arvot valittiin yksittäisen kokeilun perusteella. Prosessointiarvojen vaihtelua kokeiltiin ennen koeajoa, jotta tiedettäisiin, onnistuuko prosessointi näillä arvoilla. Ongelmaksi voisi teoriassa muodostua muotin tai koneen vioittuminen tai tuotteiden todella huono laatu. Stasa QC ei avusta näissä tilanteissa, vaan prosessoijan tulee itse tietää, mitä laitteet kestävät. Mutta kuvan 5.8 parametreilla ei tullut ongelmia, sillä ruiskutuspaineet pysyivät matalalla tasolla. Ruiskutukseen ehdotettiin käytettäväksi kahta vaihetta, jotta tuotteen muotojen aiheuttamat virtausmuutokset vältettäisiin. Perusteena oli, että kun tuote valetaan umpinaisen pään keskeltä, muovin virtaus on ensin laitoja kohti leviävää, jonka jälkeen virtaus supistuu kohti avointa päätä. Tästä syystä suppenevaan osaan tulisi käyttää pienempää ruiskutusnopeutta verrattuna laakeaan osaan. Tällöin siis laakea umpinainen kappaleen pää täyttyisi nopeasti ja tämän jälkeen pienemmällä nopeudella saataisiin suppeneva osa yhtä nopeasti täyteen, jolloin kappaleen täyttymisnopeus olisi tasainen. Koska muotti oli vasta sisäänajovaiheessa, päätettiin että ruiskutusnopeus pidettäisiin yksivaiheisena, ja seuraavat ajot tulisivat optimoimaan kaksivaiheisen ruiskutusprofiilin käyttöön tämän yksivaiheisen optimointituloksen pohjalta.

Mittauksiin käytettävä aika pyrittiin minimoimaan, joten erilaiset mekaaniset testit jätettiin pois mittausohjelmasta. Sen sijaan keskityttiin visuaalisiin tekijöihin ja helposti ja nopeasti mitattavaan massaun, nämä ominaisuudet voidaan nähdä kuvan 5.9 listauksessa. Näiden mittausten suorittaminen voidaan tehdä ruiskuvalun yhteydessä samalla, kun kappaleita valetaan. Tämä palvelee nopeaa muotin käyttöönottoprosessia, joka olisi esimerkiksi yritystoiminnassa tärkeä tekijä.

Quality features							
<div> Add quality feature Edit quality feature Remove feature Import Export </div>							
<input checked="" type="checkbox"/> Online forecasting <input checked="" type="checkbox"/> No online forecasting (change by double click)							
Quality feature	Cavity	Type	Unit	Lower tolera...	Target ...	Upper tolera...	Attributes
<input checked="" type="checkbox"/> Massa	1	continuous	g	35.2	35.4	35.6	-
<input checked="" type="checkbox"/> vajaatäyttö	1	attributive		4	5	5	1, 2, 3, 4, 5
<input checked="" type="checkbox"/> ehjä irtoaminen muut...	1	attributive		kyllä	kyllä	kyllä	kyllä, ei
<input checked="" type="checkbox"/> purseen määrä	1	attributive		2	3	3	1, 2, 3

**Kuva 5.9.** Mitattavat laatuparametrit TPE-kappaleelle. Suurin osa parametreista valittiin attributiiviksi, ja ne arvioidaan subjektiivisesti.

Kuvan 5.9 parametrit ovat siis massaa lukuun ottamatta attributiivisia eli epäjatkuvia, vajaatäytön asteikko yhdestä viiteen on melko laaja, mutta oletettavasti valmistettavissa tuotteissa tulisi olemaan eriasteisesti täyttyneitä kappaleita. Tällöin paras arvo tulisi olemaan viisi kokonaan täyttyneelle kappaleelle. Vastaavasti purseen määrä arvioidaan kolmiportaisella asteikolla suurimman arvon ollessa tavoiteltu optimiarvo. Massan osalta tavoitearvoksi asetettiin kuvassa näkyvä 35,4 g, ja toleranssin poikkeamaksi asetettiin 0,2 g kumpaankin suuntaan. Kolmen koneparametrin yhdistäminen neljään arvioitavaan parametriin tuotti koeajosarjaksi kuuden yhdistelmän ajon, joka voidaan nähdä alapuolella kuvassa 5.10. Stasa QC teki tämän koeajon yhdistelemällä annettuja parametreja, kuten edelläkin olleet tutkimustapaukset. Tätä ohjelmaa noudatettiin suorassa järjestyksessä pitäen muuttia 30 °C vakio-lämpötilassa.

Experiment- No.	Shots per experiment	Comment	jälkipaine [bar]	ruiskutusnopeus [mm/s]	vaihtopiste [mm]
1	6		400	75	15
2	6		300	50	12
3	6		300	100	18
4	6		500	50	18
5	6		500	100	12
6	6		400	75	15

**Kuva 5.10.** Koeajolistaus TPE-muotin koeajoa varten kuvakaappauksena Stasa QC -ohjelmasta.

Edellä mainitusti tätä TPE-kappaletta oli ruiskuvalutettu käyttäen 60 mm/s ruiskutusnopeutta, 400 barin jälkipainetta ja 15 mm vaihtopistettä ja kyseisellä kokeilulla saatiin kohtuullisen hyviä kappaleita valmistettua. Koeajolistauksessa siirrytään melko kauas näistä arvoista, esimerkiksi kokeessa numero 5 ruiskutusnopeus on 100 mm/s ja jälkipaine 500 baria. Toisaalta käytetään myös matalampia arvoja, kuten kokeessa numero 2. Tämän kaltaiset laajat vaihteluvälit ovat hyviä tuomaan tietoa kunkin muuttujan vaikutuksesta prosessiin. Tällöin saadaan rakennettua Stasa QC:n avulla tarkempi malli prosessista.

## 5.4 Rotaatiovalulaitteiston käyttöönotto

Tampereen teknillisen yliopiston polymeerilaboratorin rotaatiovalulaitteiston oli tarkoitus valmistua tämän opinnäytetyön kirjoittamisen aikana, mutta eri syistä johtuen sitä ei saatu mukaan tähän työhön varsinaisena tutkimustapauksena. Tässä opinnäytetyössä tarkastellaankin rotaatiolaitteistoa tästä syystä virtuaalisena tutkimustapauksena. Laitteiston valmistumisen jälkeen Stasa QC – ohjelmaa voitaisiin käyttää muotin käyttöönottoprosessissa, jolloin tietokoneohjelma rakentaa erilaisten muuttujien väliset yhteydet koeajon tekijän nähtäville. Ongelmallista nimenomaan rotaatiovalun optimoinnissa on sen vaatimat pitkät prosessointiajat, jolloin näytteitä ei voida valmistaa ja kokeita ei voida tehdä samassa mittakaavassa kuten esimerkiksi ruiskuvalussa. Ruiskuvalun avulla

saadaan kymmenen näytettä valmistettua alle viidessä minuutissa, mutta vastaavan määrän valmistaminen rotaatiovalulla voi tyypillisesti viedä tunnin jokaista näytettä kohti. Tällöin siis pienestä määrästä näytteitä tulisi saada mahdollisimman tarkasti suuri määrä tietoa.

Rotaatiovalettujen kappaleiden yleisimpiä käyttötarkoituksia ovat erilaiset suuret astiat ja säiliöt. Niiden visuaaliset ominaisuudet ovat usein ulkopinnalta hyvät, mutta sisäpinnan laatu voi olla heikompi, koska muotin sisäpinta muodostaa kappaleen ulkopinnan. Arvioitaviksi ominaisuuksiksi otettaisiinkin ulkopinnan laatu, jolloin kyseinen asteikko voisi muodostua esimerkiksi viisiportaiseksi, subjektiivisesti arvioitavaksi laatutekijäksi. Arvioitavien laatutekijöiden listaus on nähtävissä taulukossa 5.3. Muotin erilaisten inserttien tutkiminen käyttöönnoton yhteydessä olisi mahdollista myös Stasa QC – ohjelman avulla. Näistä inserteistä voitaisiin tutkia esimerkiksi mittatarkkuutta, jolloin mittojen muutokset prosessoinnin jälkeen olisivat tutkimuksen kohteena. Rotaatiovalussa ei muodostu riittävällä jäähdytysnopeuksilla suuria jäännösjännityksiä, joten kutistumien tulisi olla melko tasaisia ympäri kappaletta. Erilaisten viilennysmenetelmien ja –nopeuksien yhteydessä voidaan kuitenkin törmätä tilanteisiin, joissa viilennysnopeuden suuret arvot aiheuttavat liian nopeaa jäähtymistä ja sitä kautta erilaisia jäännösjännityksiä, jotka johtavat vääntymien ilmenemiseen.

**Taulukko 5.3.** *Kone- ja mittaussparametrit rotaatiovalututkimukselle.*

Koneparametrit	Mittaussparametrit
Muotin lopullinen maksimilämpötila	Vetokoe
Lämmitysnopeus	Iskukoe
Viilennysnopeus	Vääntymien analysointi
Alipaineen arvo	Yksityiskohtien visuaalinen laatu
Pyöritysnopeus	Pinnanlaatu (sintrautuneisuus)
	Pinnanlaatu (terminen hajoaminen)
	Insertin mittatarkkuus

Näiden huomioiden jälkeen tarkasteluun tulisi ottaa siis myös viilennysmenetelmä ja viilennysaika. Yksittäisinä tekijöinä nämä kaksi voitaisiin tutkia tarkemmin, mutta prosessin ja lopputuotteen kannalta on merkityksentöntä, mikä menetelmä viilentää muottia. Jos viilennysmenetelmä ja sitä kautta viilennysaika saadaan tehostettua prosessin kannalta parhaiksi mahdollisiksi, voidaan tehdä huomattavasti nopeammalla tahdilla laadultaan riittävän hyviä tuotteita. Tietenkin viilennysnopeuden kontrollointi on koko prosessin kannalta ehdottoman tärkeää. Jo ennen viilennyksen aloittamista tehtävä muovijauheen sulattaminen muotin seinämään olisi tehtävä mahdollisimman nopeasti kuitenkin sillä edellytyksellä, että jauhe ei ala hajota termisesti. Tästä syystä otetaan mukaan myös lopulliselle maksimilämpötilalle erilaisia prosessointiarvoja muotin seinämästä tai muotin sisälämpötilana mitattuna. Tämän lisäksi tulee tutkia lämmitysnopeuden vaikutusta lopulliseen tuotteeseen erikseen.

## 5.5 Monikerroskalvon ekstruusio

Monikerroskalvojen ekstruusiota oli myös tarkoitus tutkia tämän opinnäytetyön puitteissa, mutta yhteistyö jouduttiin resurssipulan takia jättämään tutkimuksesta pois. Tarkastellaan monikerroskalvojen ekstruusioprosessia virtuaalisena tapauksena tästä syystä. Kolmesta erillisestä kalvosta muodostuva puolivalmiste oli suunniteltu tutkittavaksi, joten esitetään tässä kyseiselle tuotteelle tutkimussuunnitelma. Tuotteen koeajo ja optimointi toteutettaisiin varsinaisen tuotannon yhteydessä osana normaalia tuotantoa, jolloin ei tarvitse käyttää kallista tuotantoaikaa ja laitteistoa huonon kalvon valmistukseen. Periaatteena onkin pysyä selvästi prosessointi-ikkunan sisällä, jotta tuote vastaa tarvittavia ominaisuuksia koko koeajon ajan. Prosessi-ikkunassa liikuttaessa voidaan kuitenkin löytää optimoitu tilanne, jossa tuote vastaa vaadittuja ominaisuuksia, mutta sen valmistusprosessi on nopeimmillaan ja materiaalin käyttö niukinta. Koeajon aikana vaihdetaan prosessiparametreja ja annetaan laitteiston stabiloitua ennen näytteen ottamista, kuten aina edellisissäkin koeajoissa on tehty.

Käytettyjen kolmen ekstruuderin suuttimen lämpötilat on perusteltua ottaa mukaan tarkasteluun, koska niiden suorat sekä keskinäiset yhteisvaikutukset lopulliseen puolivalmisteeseen ovat selvät. Tämän lisäksi koko kalvon vetämiseen käytetty nopeus on suuri vaikuttaja puolivalmisteen lopulliseen paksuuteen ja ominaisuuksiin sen orientoivan vaikutuksen takia. Parametrien listaus voidaan nähdä kuvassa 5.4 alla.

**Taulukko 5.4.** Monikerroskalvoille tutkimukseen valittavien kone- ja tuoteparametrien listaus.

Koneparametrit	Mittausparametrit
Ekstruuderien lämpötilat (3 kpl)	Yksittäiskalvojen paksuudet (3 kpl)
Ruuvien pyörimisnopeudet (3 kpl)	Puhkaisulujuus koko kalvolle
Laajennussuhde (blow-up ratio)	Pinta-alan ja massan suhde
Vetonopeus	Adheesion testaus
Viilennysilman lämpötila	

Vetonopeuden lisäksi laajennussuhteen (blow-up ratio) tarkastelu tulisi ottaa mukaan vaikutustensa takia, sillä myös sen seurauksena kalvo orientoituu ja ohenee. Puhallettaessa kalvoa isommaksi sitä myös viilennetään, jolloin se jäähtyy ja jää venytettyyn muotoon, josta se laitetaan rullalle. Tämän viilennysilman lämpötila voitaisiin myös ottaa tarkasteluun, sillä sen kontrollointi on verrattain yksinkertaista.

## 6 TULOKSET

Edellä kuvattujen koesuunnitelmien tulokset ovat esitettynä tässä luvussa kukin koejärjestely omana kokonaisuutenaan. Yhteenveto eri tuloksista tarkastellaan viimeisessä luvussa.

### 6.1 Uponor Oy:n tuotantoprosessin optimointi Stasa QC – ohjelmalla

Taulukossa 5.1 esitettyä ruiskuvaluohjelmaa noudatettiin esitetyssä järjestyksessä, jonka jälkeen näytteiden annettiin levätä ennen testaamista seitsemän päivän ajan. Tämän jälkeen suoritettuihin mittauksiin kulunut aika oli merkittävä, sillä vaikka kustakin 11 koeajosta testattiin yhtä pesää kohti kolme näytettä tuli näytteitä lopulta  $11 \times 8 \times 3$  eli 264 kappaletta. Pelkästään vetokokeisiin kulunut aika tällaiselle testauspaketille oli noin kuusi tuntia. Näiden lisäksi testattiin edellä esitetysti massa ja kaksi sisähalkaisijaa sekä visuaalinen laatu. Kylmälääjennustestit jätettiin mittausten jälkeen pois analysoinnista, sillä testeissä ei tullut kaikkien näytteiden osalta kuin yksi hajoaminen. Tästä syystä Stasa QC – ohjelmaan ei viety mittaustulosta, josta ei olisi hyötyä optimoinnin kannalta. Tavoitteena olisi, että tuoteominaisuuksissa olisi vaihtelua, jolloin ohjelma voisi rakentaa yhteyksiä eri parametrien arvojen ja tuotevasteiden välille. Tässä mielessä kylmälääjennuksen valinta parametriksi oli epäonnistunut, sillä sen käyttäminen ei tuonut tietoa ohjelman tarpeisiin. Luonnollisesti tuotteen soveltamiseen käytännön maailmassa tällainen tulos on hyvin rohkaiseva, sillä suurikaan prosessointiarvojen muutos ei vaikuttanut tuotteen laajennettavuuteen ja sitä kautta tuotteen käytettävyyteen asennusvaiheessa.

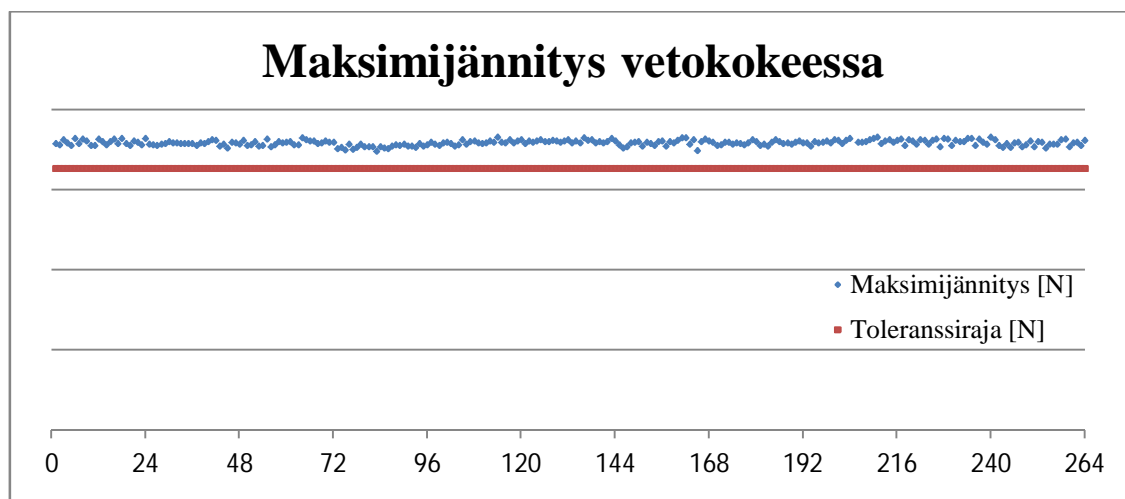
#### 6.1.1 Optimointiprosessi

Mittausdatan valmistuttua se siirrettiin Stasa QC 2013 – ohjelmaan, ja prosessin optimoitu tulos saatiin valmiiksi noin kahden minuutin kuluttua. Nopean tietokoneohjelman ansiosta mittauksiin kuluva aika muodostuu pisimmäksi koko optimointiprosessin aikana, olettaen, että prosessista on valmiiksi tietoa, jonka pohjalta voidaan saada muodostaa tärkeimpien parametrien joukko ja parametreille sopivat vaihteluvälit. Tällöin ei tarvitse tehdä useita peräkkäisiä kokeita tiettyjen parametrien ja parametrivälien määrittämiseksi. Stasa QC 2013 muodosti optimoinnin jälkeen parametreille arvot:

- Massan lämpötila  $\pm 0\text{ }^{\circ}\text{C}$
- Ruiskutusaika 1,5 s
- Vastapaine + 10 bar
- Jälkipaine - 15 bar
- Annostusnopeus – 20 %

Erikoisin tulos tässä optimoinnissa on annostusnopeuden arvon siirtyminen ulos optimointialueelta. Tämä saattaa selittyä koesuunnitteluohjelman muutoksilla, sillä koeajon jälkeen käytettyjen parametrien tarkat arvot sijoitettiin koeajolistaukseen. Tämä on voinut vaikuttaa ohjelman tekemiin tulkintoihin eri parametrien vaikutuksesta. Vaikutusta ei pääse kuitenkaan tutkimaan, muuten kuin tutkimalla optimoidun tuotteen tuloksia, mikä tullaan toki suorittamaan myöhemmin näiden tulosten käsittelyn aikana.

Kuvassa 6.1 on esitetty mitatut vetokoetulokset. Niissä näkyy, kuinka testausparametrien vaihtelu vaikuttaa suurimpaan mitattuun jännityksen arvoon. Kuvan numeeriset arvot on jätetty pois, mutta akseleiden leikkauskohta on kuitenkin origossa. Huomattava tulos tässä tutkimuksessa oli, että kaikki tulokset pysyivät toleranssin yläpuolella, vaikka parametrien vaihteluväliä oli pyritty laajentamaan niin suureksi, että tuloksissa tulisi jopa alle toleranssin olevia tuotteita. Kuvassa 6.1 vetokoetulokset ovat koeajolistauksen mukaisessa järjestyksessä, joten mittaustuloksissa nähdään selkeitä hyppäyksiä ylös ja alas. Eri koeajojen välinen vaihtelu voidaan nähdä hyvin, sillä aina 24 peräkkäistä näytettä on samasta koeajosta ja pesät ovat numerojärjestyksessä pienimmästä suurimpaan.



**Kuva 6.1.** Maksimijännityksen arvot järjestettynä koeajojärjestykseen sekä kasvavan kokeen numeron että kasvavan pesän numeron mukaan.

Melko tasaiset arvot mittaustuloksissa kertovat prosessointimenetelmän vakaudesta, sillä koeajon aikana nostettiin suuttimen lämpötilaa 30 celsiusasteen verran. Tämän lisäksi myös ruiskutusnopeudessa lyhin käytetty aika oli hieman yli puolet suurimmasta ruiskutusnopeuden ajasta, kuten taulukosta 5.1 voidaan todeta. Koeajo vei noin kuusi



tuntia aikaa kokonaisuudessaan, jonka jälkeen ajettujen näytteiden annettiin stabiloitua seitsemän päivää.

Stasa QC – ohjelman luomaa mallia Uponorin tuotteen suhteen voidaan tarkastella ohjelman mallistaan antaman datan suhteen. Muodostaessaan mallin se tulkitsee, miten hyvin malli noudattaa mittaustuloksia, jolloin voidaan arvioida, onko saadusta optimointituloksesta apua. Arvioinnissa huomattiin, että malli ei toteuttanut yli 90 % r-neliön (determinaatiokerroin) tavoitetta, mutta mallin ennusteen ja todellisten mittaustulosten absoluuttiset erot olivat kuitenkin pienet. Tällöin siis r-neliön arvo ei ole merkittävä, vaikka sen perusteella pitäisikin tulla heikkoja ennustuksia. Mallin koostetut determinaatiokerrointen tulokset ovat nähtävissä taulukossa 6.1. Siinä on jokaisesta pesästä laskettu keskiarvo ja keskihajonta. Keskiarvo antaa yleiskuvan tuloksen tasosta ja keskihajonta kertoo, miten paljon eri pesille muodostetut mallit eroavat yleisen keskiarvomallin mukaisesta determinaatiokertoimen arvosta.

**Taulukko 6.1.** Mallin determinaatiokerrointen ( $R^2$ ) tulokset Uponor Oy:n tuotteelle.

	Vetokoe [%]	Korkeus [%]	Halkaisija stoppipää [%]	Halkaisija putkipää [%]	Pinnanlaatu [%]	Massa [%]
Keskiarvo	36,2	75,33	25,9	20,28	87	72,89
Keskihajonta	7,95	3,78	9,23	9,23	0	2,83

Tavoiteltavana oleva 90 prosentin determinaationkertoimen arvoa ei saavutettu yhdessäkään laatuparametrin mallissa. Tämä lienee seurausta mitattujen koekappaleiden pienestä lukumäärästä, sillä kolme rinnakkaisnäytettä samasta pesästä ei sisällä vielä kovinkaan suurta tilastollista variaatiota, jota Stasa QC – ohjelma tarvitsee. Stasa QC ei sinällään tiedä muovimateriaalien prosessoinnista mitään, joten sille tulee antaa jopa enemmän tietoa, kuin mitä voisi kuvitella sen tarvitsevan. Vertailu seuraavan kappaleen tuloksiin tulee tuomaan lisätietoa Stasa QC:n kyvyistä muodostaa malleja laajemman mittausdatan kautta.

### 6.1.2 Optimituotteen ruiskuvalu

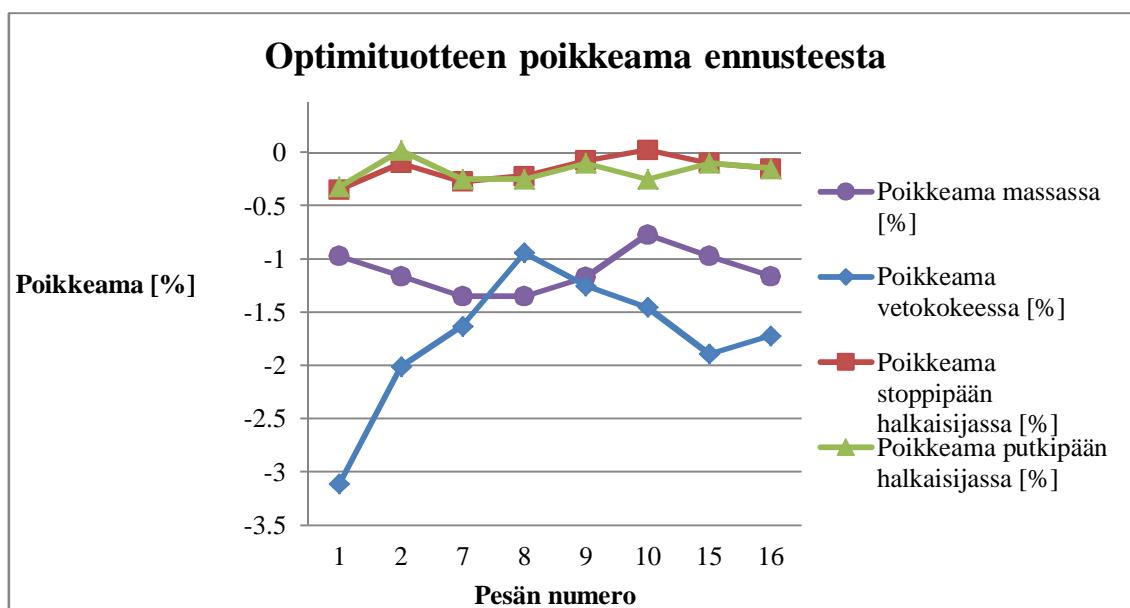
Mallien oikeellisuutta testattiin vielä ajamalla optimoidun tuotteen parametreilla uusia tuotteita. Koska tuotantoaikataulut eivät mahdollistaneet saman ruiskuvalukoneen käyttöä, ja optimituote ruiskuvalettiin hieman pienemmällä sylinterin halkaisijalla varustetulla koneella käyttäen samaa muottia kuin koeajossa. Parametrit jouduttiin sovittamaan laskennallisesti isommalta koneelta pienemmälle, joten tämä saattaa aiheuttaa muutoksia saataviin tuloksiin. Jokaisen pesän suhteen voidaan siis havaita vakiosuuruinen ero tavoiteltavan tuloksen ja mittausarvon välillä. Tällainen koneen vaihto optimointiprosessin kesken ei ole kovinkaan toivottava menettelytapa, mutta tässä tilanteessa aikataulujen sovittaminen ei ollut mahdollista muulla tavalla.

Ruiskuvallettujen optimituotteiden tuotteiden mittauksista saatiin taulukko 6.2, jossa on nähtävissä prosentuaalinen ero ennusteen ja mittaustulosten välillä. Nämä tulokset ovat yksittäisestä tuotteesta mitattuja, joten niiden vaihteluväli voidaan olettaa luonnollisen vaihtelun piirissä prosentin tai kahden suuruiseksi. Tämän suuruusluokan vaihtelua oli havaittavissa myös koeajona tehtyjen tuotteiden piirissä. Tällöin mittauksissa oli mukana kolme tuotetta. Tässä mielessä halkaisijamittojen poikkeaminen alle prosentin verran ennusteesta on hyvä tulos. Suurimmat erot syntyivät vetokoetuloksen suhteen. Suurimpana havaittu hieman yli kolmen prosentin poikkeama (vetokokeessa) on kuitenkin vielä melko pieni. Johdonmukaisesti tulokset pysyivät kuitenkin alle ennustearvojen, mistä siis taulukon negatiiviset arvot lähes jokaisen pesän kohdalla. Ainoastaan pesän 2 putkipään halkaisija, sekä pesän nro 10 stoppipään halkaisijamitat olivat positiivisen poikkeaman puolella.

**Taulukko 6.2.** Mittaustulosten prosentuaalinen poikkeama ennustearvosta.

Pesä nro	Poikkeama vetokokeessa [%]	Poikkeama stoppipään halkaisijassa [%]	Poikkeama putkipään halkaisijassa [%]	Poikkeama massassa [%]
1	-3.11	-0.347	-0.32	-0.97
2	-2.01	-0.099	0.02	-1.16
7	-1.63	-0.272	-0.25	-1.35
8	-0.94	-0.223	-0.25	-1.35
9	-1.25	-0.074	-0.10	-1.17
10	-1.45	0.025	-0.25	-0.77
15	-1.89	-0.099	-0.10	-0.97
16	-1.72	-0.149	-0.15	-1.16

Yksittäisiä pesiä tarkasteltaessa voidaan havaita pesän numero 1 omaavan sekä vetokokeessa että halkaisijamitoissa prosentuaalisesti suurimman poikkeaman ennusteesta. Tämän pesän poikkeamat ovat suuruudeltaan omaa luokkaansa verrattuna muihin pesiin, lukuun ottamatta massan poikkeamaa, joka tälle pesälle on sen sijaan varsin maltillinen verrattuna muihin pesiin. Kaikkien pesien massan poikkeamien tulokset ovat 0,58 prosenttiyksikön sisällä, mutta kokonaisjakauma on negatiivisella puolella. Nämä poikkeamat on esitetty vielä kuvaajana 6.2.



**Kuva 6.2.** Poikkeamat Uponor Oy:n tuotteelle.

Tämä voisi mahdollisesti tarkoittaa ruiskuvalukoneen vaihtumisesta johtuvaa virhettä. Koko koneen vaihtuminen toiseen ja erikokoisen ruuvien käyttäminen uudessa koneessa tekee mahdolliseksi kaikkien tulosten jakauman siirtymisen havaitulla tavalla. Laitteiston muutoksen voidaan siis ajatella tuovan vakiosuuruisen virheen kaikkiin tuloksiin verrattuna alkuperäisen koeajon optimituotteen tavoitteisiin. Vastaavalla tavalla voidaan arvioida käyneen myös muiden tulosten suhteen.

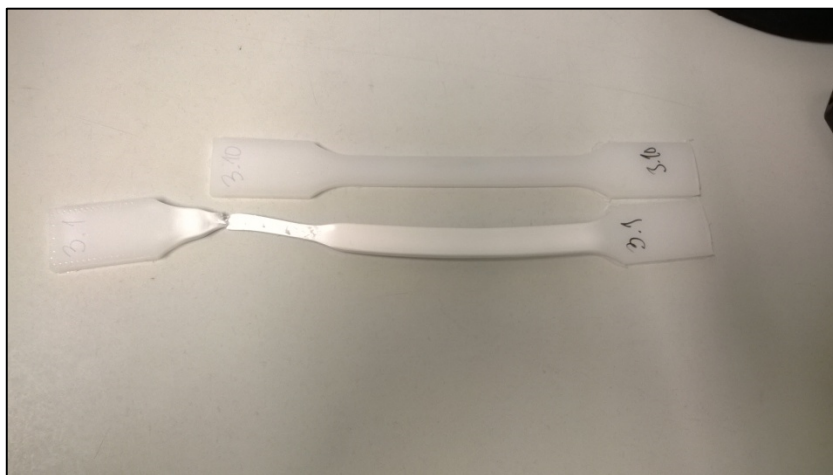
## 6.2 Stasa QC - ohjelman ja Taguchin menetelmän vertailu

Kahden optimointimenetelmän vertailulla pyritään selvittämään optimointitulosten tarkkuutta sekä menetelmien käytön helppoutta toisiinsa verrattuna. Myös menetelmien tuomat tiedot prosessin kone- ja laatuparametrien välisistä riippuvuuksista tulevat tarkasteluun, sillä parametrien suhteellinen vaikutus toisiinsa on prosessitietouden ydin-alue. Seuraavana esitellään tulokset koeajoista, joiden koejärjestelyt esiteltiin kappaleessa 5.2. Alapuolella kuvassa 6.3 voidaan nähdä polypropeenisauva vetokokeen aikana. Siinä nähdään kappaleilleen tyypillinen hajoamistyyppi, jossa materiaalin murto-venymä kasvaa suureksi, kun vetonopeus on riittävän hidas.



**Kuva 6.3.** Polypropeenisauva vetokokeen aikana. Kappaleessa on havaittavissa hieman kuiduttumista ohentuneessa kohdassa.

Tässä tapauksessa vetonopeutena sekä Stasa QC että Taguchin menetelmän sauvoille käytettiin 50 mm/min nopeutta. Se oli tälle materiaalille hieman liian hidas nopeus, sillä vetoon kulunut aika oli varsin pitkä. Lopulta kappaleen murtuessa saatiin kuvan 6.4 mukainen tulos. Tässä kuvassa on vertailukohtana ehjä vetokoesauva, jolloin voidaan tarkastella murtovenymää.

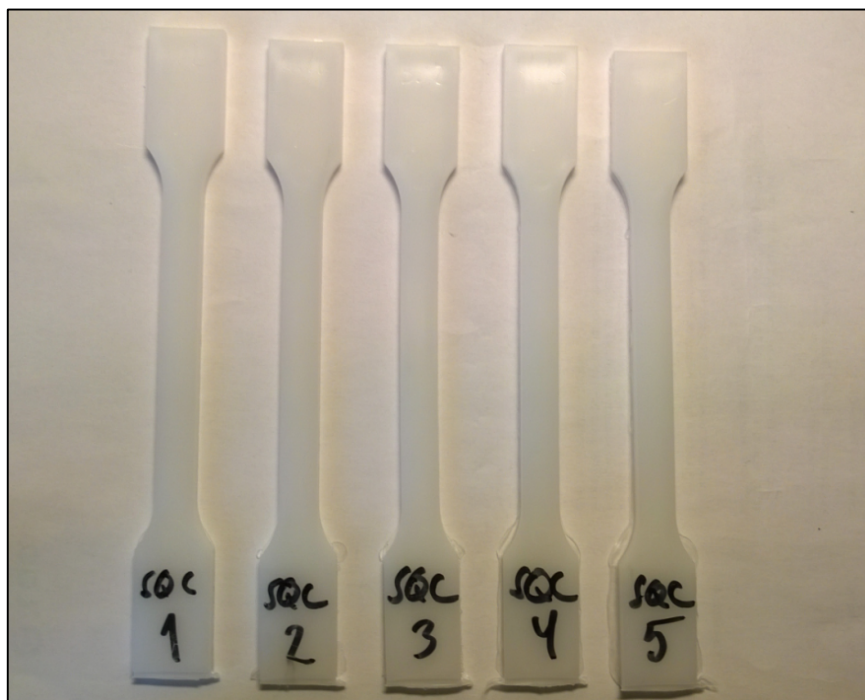


**Kuva 6.4.** Vetokoesauvan tyypillinen venymä vetokokeen aikana.

Kuvan 6.4 tyyppinen murtuma oli kokeiden aikana ainoa murtumatyyppi, jota havaittiin. Tämän kuvan kappale on taguchin menetelmän koekappale, mutta Stasa QC:lla tehtäville kokeille saatiin luonnollisesti samanlaiset hajoamistyytit.

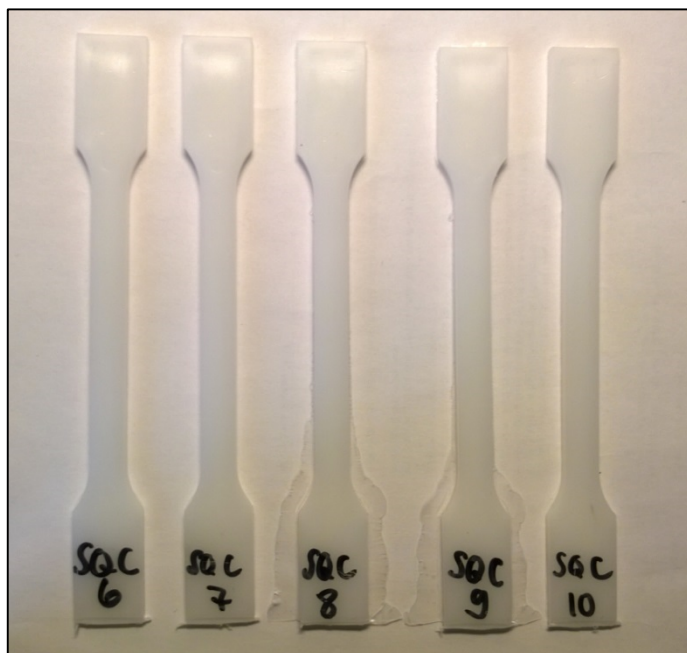
### 6.2.1 Stasa QC -koeajon tulokset

Ruiskuvalamisen jälkeen sauvojen annettiin stabiloitua kolme päivää, jonka jälkeen mitattiin tuotteiden leveys ja paksuus vetokoesauvan kimmomodulin määrittämiseen käytettävältä alueelta ja vetokoesauvan pituus kokonaisuudessaan. Lisäksi määritettiin imun ja purseiden määrät asteikolla yhdestä kolmeen siten, että paras arvosana oli kolme. Sauvat myös punnittiin ja niiden kimmomoduli määritettiin käyttäen ekstensometriä ja Instron 5967 vetokonetta standardin EN-ISO 527 mukaan. Vetokoesauvojen kuvat ovat nähtävissä seuraavissa kuvissa 6.5 ja 6.6.



**Kuva 6.5.** Stasa QC - koeajon vetokoesauvat kokeille 1-5.

Koeajon viisi ensimmäistä koesarjan sauvaa täyttyivät hyvin ja ensimmäinen koe oli sekä imun että purseen osalta hyvä tuote. Taulukossa 6.3 on nähtävissä kunkin kokeen tulosten keskiarvo, joita verrattaessa koeajo-ohjelmaan, joka esiteltiin kappaleessa 5.2, voidaan jo nähdä selviä yksittäisten parametrien vaikutuksia. Esimerkiksi jälkipaine näyttää vaikuttavan kappaleiden purseiden määrään sekä kappaleen massa, koska suurimman jälkipaineen tuotteissa nämä mittausominaisuudet ovat kaikista kokeista suurimmat. Myös imun määrä oli pienimmillään, kun jälkipaineen arvo oli suurin.



**Kuva 6.6.** Stasa QC - koeajon vetokoesauvat kokeille 6-10

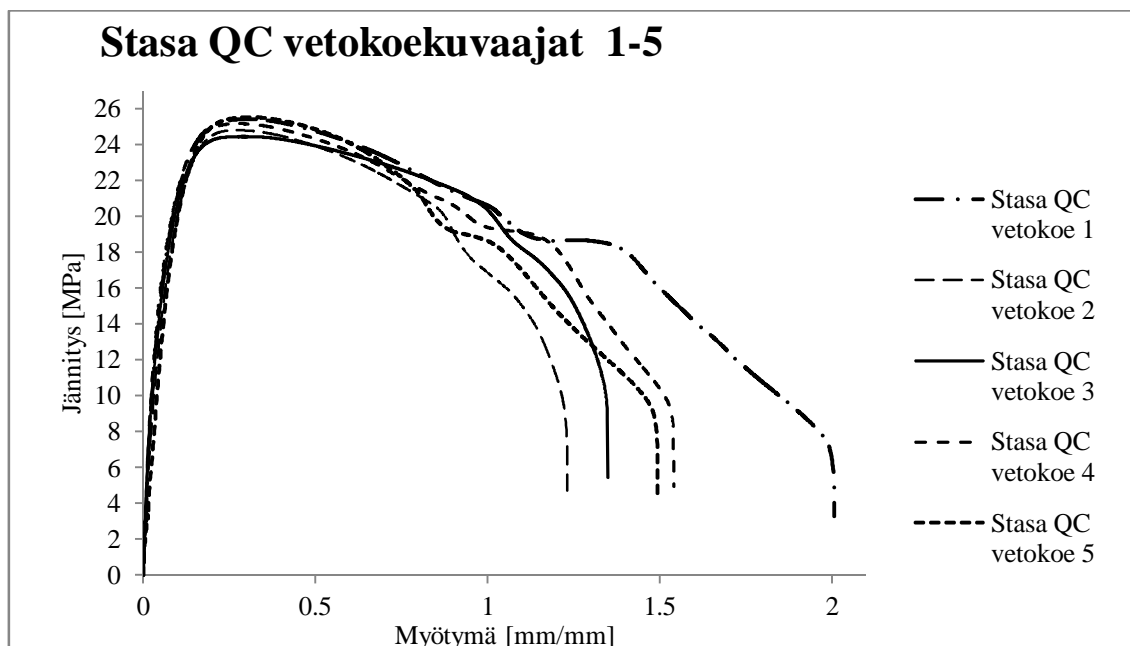
Mittauksista on koostettu alla nähtävä taulukko 6.3, jossa on saatujen tulosten keskiarvot. Mittaustuloksiin saatiin selvää vaihtelua ja se voidaan havaita, jos esimerkiksi tarkastellaan kimmomodulin arvojen suurimman ja pienimmän keskiarvon erotusta. Heikoimmat tulokset kimmomodulin osalta saatiin kokeille 2 ja 7, joiden yhdistävinä tekijöinä olivat sama jälkipaine ja muotin lämpötila.

**Taulukko 6.3.** Stasa QC - ohjelman koeajotulosten keskiarvot kullekin kokeelle.

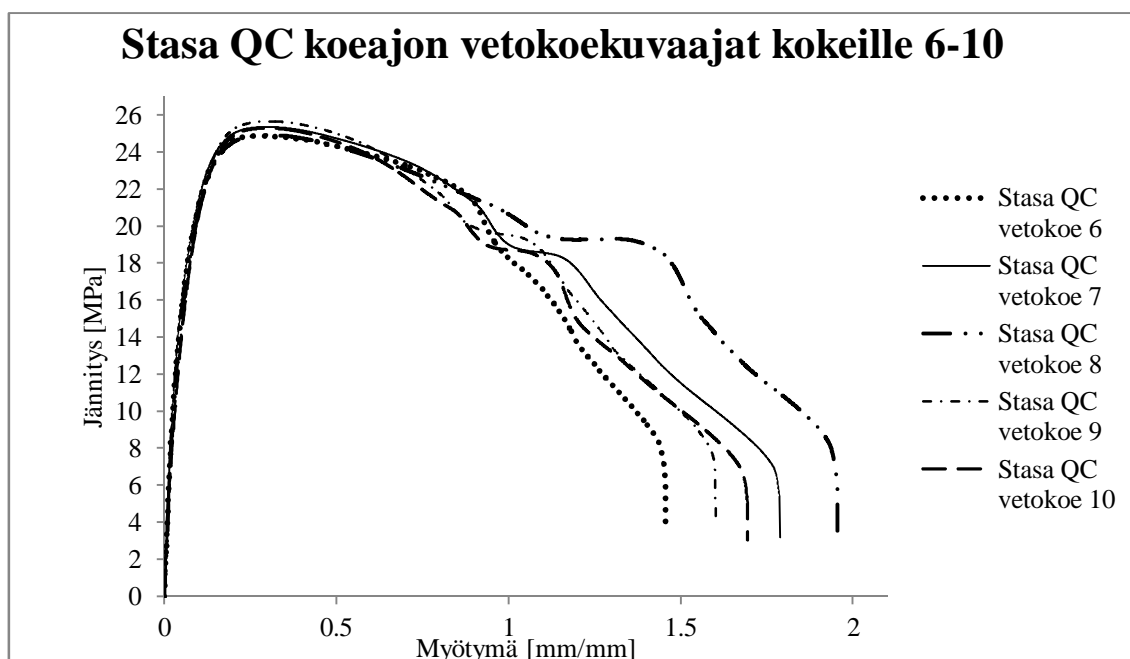
Koenumero	Paksuus [mm]	Leveys [mm]	Massa [g]	Imu [1,2,3]	Purse [1,2,3]	Kimmomoduli [MPa]	Pituus [mm]
1	4.00	9.97	13.89	2	3	1183.02	166.78
2	3.99	9.94	13.64	1	2	1057.54	166.39
3	3.99	9.99	13.59	1	2	1087.53	166.19
4	4.09	10.15	14.10	2	2	1184.08	166.51
5	4.13	10.23	14.54	3	1	1222.03	166.67
6	3.95	9.93	13.48	1	3	1115.57	166.13
7	3.96	9.93	13.74	2	3	1049.65	166.65
8	4.12	10.20	14.63	3	1	1124.54	167.00
9	4.12	10.23	14.60	3	1	1219.38	166.77
10	4.00	9.97	13.93	2	3	1178.72	166.75

Vetokokeiden kuvaajat ovat nähtävissä seuraavissa kuvissa 6.7 ja 6.8. Kahtena kuvana vetokoekäyrät erottuvat paremmin, joten ne on esitetty tällä tavalla ositeltuina tästä syystä. Kaikkien kymmenen kokeen vetokoekäyrät ovat hyvin samankaltaisia toisiinsa verrattuna, kokeissa 1-5 voidaan nähdä hieman enemmän hajontaa verrattuna kokeiden

6-10 kuvaajiin. Kuvaajiin on valittu jokaisen kokeen keskimääräinen tulos viidestä mitattusta näytteestä.



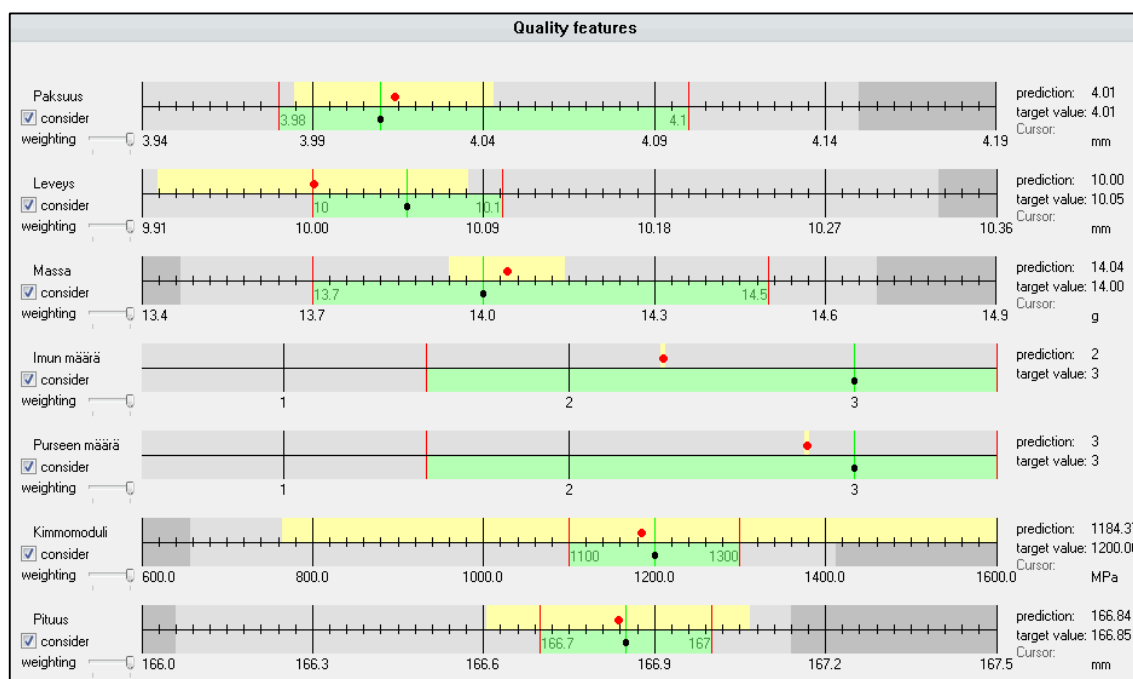
**Kuva 6.7.** Kunkin vetokokeen keskiarvokäyrät kokeille 1-5.



**Kuva 6.8.** Kunkin vetokokeen keskiarvokäyrä kokeille 6-10.

Ruiskuvaluohjelman suorittamisen ja saatujen tuotteiden mittausten jälkeen vuorossa ollut optimointi oli Stasa QC – ohjelmalle nopea toimenpide, sillä aikaa kului noin minuutti tämän prosessin optimointimallien ja optimituotteen valmistelussa. Kuva 6.9 näyttää ohjelman optimointinäkymän tuoteominaisuuksien suhteen. Mitattavien ominai-

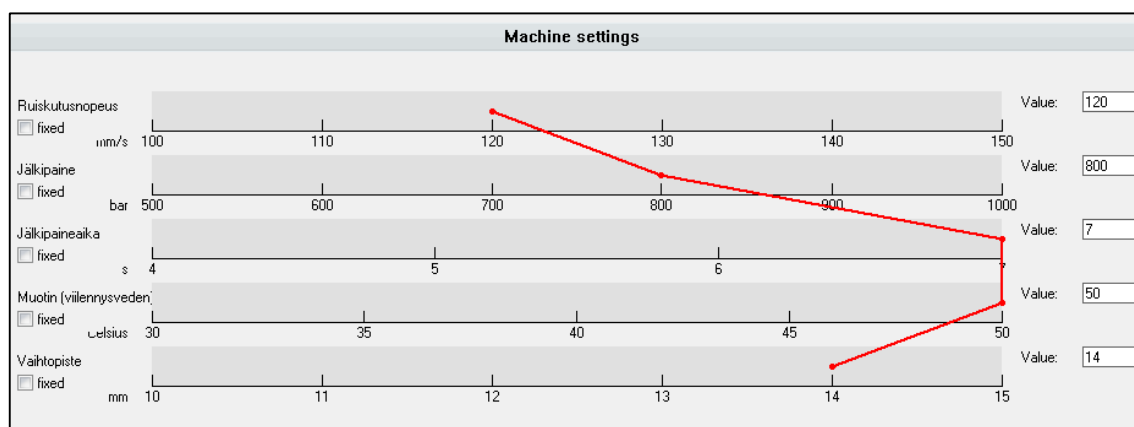
suuksien listaus on vasemmalla ja ennuste sekä tavoitearvot oikealla. Välissä on janalla näkyvissä punaisena pallona ennusteen paikka ja mustana pallona tavoitearvon sijainti. Keltainen pohja ennusteen alla on nykyisellä prosessilla saavutettavissa oleva vaihtelu-alue. Vastaava vihreä pohja tavoitteen alla on toleranssien muodostama hyväksyttävissä oleva tuoteominaisuuden alue.



**Kuva 6.9.** Optimointinäköymä, jossa on nähtävissä tuoteominaisuuksien ennuste punaisina pisteinä, ja tavoitearvot mustina pisteinä.

Kuvan 6.9 ennustetut arvot perustuvat optimoituihin koneparametreihin, jotka ovat nähtävissä kuvassa 6.10 alla. Käyttämällä tämän kuvan parametreja tulisi siis saada valmistettua kuvan 6.9 mukaisissa mitoissa ja ominaisuuksissa olevia tuotteita. Kuvan 6.9 vasemmasta laidasta voidaan huomata, että kaikki laatuparametrit olivat mukana optimoinnissa (*consider*), ja ne otettiin huomioon yhtä suurella painoarvolla (*weighting*). Mikäli näitä painotuksia muutetaan tai jätetään parametreja pois, saadaan kuvan 6.10 koneparametristaukseen luonnollisesti muutoksia. Tällöin ohjelma painottaa käyttäjän haluamia ominaisuuksia, ja on mahdollista jättää ominaisuuksia pois optimoinnista poistamalla raksi *consider*-ruudusta.





**Kuva 6.10.** Kuva optimointinäytteen koneparametreista.

Optimoidun tuotteen koneparametrit ovat jälkipaineajan ja muotin lämmitysöljyn lämpötilan suhteen prosessointi-ikkunan oletetulla ylärajalla, joten voisi olla perusteltua kokeilla laajentaa koeajon ikkunaa näiden suhteen. Tällä tavalla ajamalla uusi koeajo voitaisiin löytää ikkunan ulkopuolelta vielä lähemmäs optimituotetta vievä parametrijohdistelmä. On toki mahdollista jo nyt ohjelman sisällä laajentaa tämä alue suuremmaksi ja tutkia, millaisia koneparametreja Stasa QC käskää käyttämään. Tällöin kuitenkin ennustava malli laajenee mittaustulosten ja käytettyjen koneparametrien alueen ulkopuolelle, joten sen varmuus laskee merkittävästi. Ohjelmalla ei ole mitattua dataa tämän alueen prosesseista, joten ennuste voi erota todellisista tuloksista valtavasti. Tästä syystä koeajon toteuttaminen ja sen tietojen ajaminen samaan malliin olisi perusteltua.

Optimoinnin tuloksissa on myös mahdollista tarkastella eri koneparametrien painoarvoja suhteessa tuoteominaisuuksiin, jolloin saadaan prosentuaalinen tieto kunkin koneparametrin vaikutuksesta tuotteen eri ominaisuuksiin. Siten voidaan oppia ymmärtämään prosessin toimintaa ja löytää tärkeimpiä vaikuttavia tekijöitä. Tällainen tulos on tarkasteltavissa kuvassa 6.11 alla. Aiemmin tuloksista tulkittiin jo jälkipaineen vaikutus merkittäväksi, mutta jälkipaineajan suhteellisesti suuri, noin 26 % vaikutus jää jälkipaineen dominoivan vaikutuksen alle, eikä se näy suoraan eri massan arvojen vaihteluna. Stasa QC antaa myös sanallisen arvion vaikutuksesta, jolloin eri parametrit luokitellaan korkean, keskimääräisen ja matalan vaikutuksen luokkiin. Nämä voidaan nähdä kuvan oikeassa laidassa. Koneparametrien painoarvot muodostetaan optimoinnin yhteydessä kaikille eri laatuparametreille, ja nämä on esitetty kuvina liitteessä numero 3 tämän opinnäytetyön lopussa. Parhaimmassa tapauksessa löytyy kaksi tai kolme vahvasti vaikuttavaa tekijää, joiden yhteinen prosenttiosuus on yli 90 %. Massan tapauksessa kaksi voimakkainta tekijää omaavat yli 80 % osuuden, ja kolmannen mukaan ottaminen nostaa lukeman lähelle 95 % arvoa. Mikäli prosessin parametrit vaikuttavat tasaisesti tiettyyn tuoteominaisuuteen, tulee prosessin optimoiminen olemaan vaikeampaa. Kuvan 6.4 palkit tulee tulkita siten, että oikealle kuvassa suuntautuvat ja sinisellä värillä merkityt palkit ovat positiivisen korrelaation piirissä, toisin sanoen jälkipaineen nostaminen nostaa massaa tässä tapauksessa. Negatiivista korrelaatiota merkitään punaisella, ja nämä palkit suuntautuvat kuvassa vasemmalle.

Quality features	Estimated explanatory values of machine parameters		
	Machine parameter	Explanatory value for selected quality feature	Impact
Paksuus	Jälkipaine	55.1%	high
Leveys	Jälkipaineaika	26.3%	high
Massa	Vaihtopiste	13.7%	average
Imun määrä	Ruiskutusnopeus	2.6%	low
Purseen määrä	Muotin (vielenäysveden) lämpötila	2.3%	low
Kimmomoduli			
Pituus			

**Kuva 6.11.** Koneparametrien prosentuaalinen vaikutus massa.

Optimoinnin yhteydessä muodostettua prosessointimallia voidaan tarkastella myös sen tarkkuuden ja ennustamiskyvyn mukaan, jolloin voidaan tutkia, saadaanko kyseisellä mallilla synnytettyä oikeanlaisia tuotteita. Stasa QC muodostaa mallistaan determinatiokertoimien avulla tulkittavat tulokset. Jos determinatiokertoimen arvo on yli 90 %, on mallin antama ennuste hyvä, sillä tällöin muodostettu malli seuraa mittaustuloksia hyvin. Taulukossa 6.4 on nähtävissä jokaisen parametrin pohjalta muodostetun mallin determinatiokertoimet ja sovitetut determinatiokertoimet sekä absoluuttisten virheiden arvot keskiarvoina ja maksimaalisina virheinä.

**Taulukko 6.4.** Stasa QC - ohjelman muodostaman mallin determinatiokertoimen tulokset.

Stasa QC	Paksuus	Leveys	Massa	Imun määrä	Purseen määrä	Kimmomoduli	Pituus
Determinatiokerroin	97.8 %	92.2 %	99 %	100 %	100 %	50,5 %	91.60 %
Sovitettu determinatiokerroin	97.7 %	91.7 %	98.90 %	100 %	100 %	47,8 %	91.00 %
Absoluuttisen virheen keskiarvo	0.008 mm	0.024 mm	0.032 g	0	0	45,44 MPa	0.063 mm
Maksimaalinen absoluuttinen virhe	0.031 mm	0.125 mm	0.133 g	0	0	187,48 MPa	0.266 mm

Taulukon 6.4 erikoisin tulos on kimmomodulin mallin determinatiokertoimen huono arvo. Ohjelma ei siis osannut muodostaa toimivaa mallia tästä mittaushuoneesta. Huomattaessa absoluuttisten virheiden suuruus kimmomodulin mallin osalta on kuitenkin mahdollista ymmärtää, että malli on melko tarkka. Keskiarvoisesti malli siis poikkeaa tuloksesta 45,88 MPa, joka ei ole kovin suuri arvo, jos verrataan mittaustulosten arvojen vaihtelua. Suurimman ja pienimmän arvon välillä on noin 170 MPa ero, jolloin keskelle tuota aluetta sijoitettu prosessointi-ikkuna pysyisi selvästi kaikkien optimoinnin aikana saatujen mittaustulosten sisäpuolella. Maksimaalinen ero, joka kimmomodulin ennustamisessa saatetaan havaita, on taulukon mukaisesti 187 MPa, joten mittaustulosten koko alue voidaan kattaa prosessin vaihtelun seurauksena.

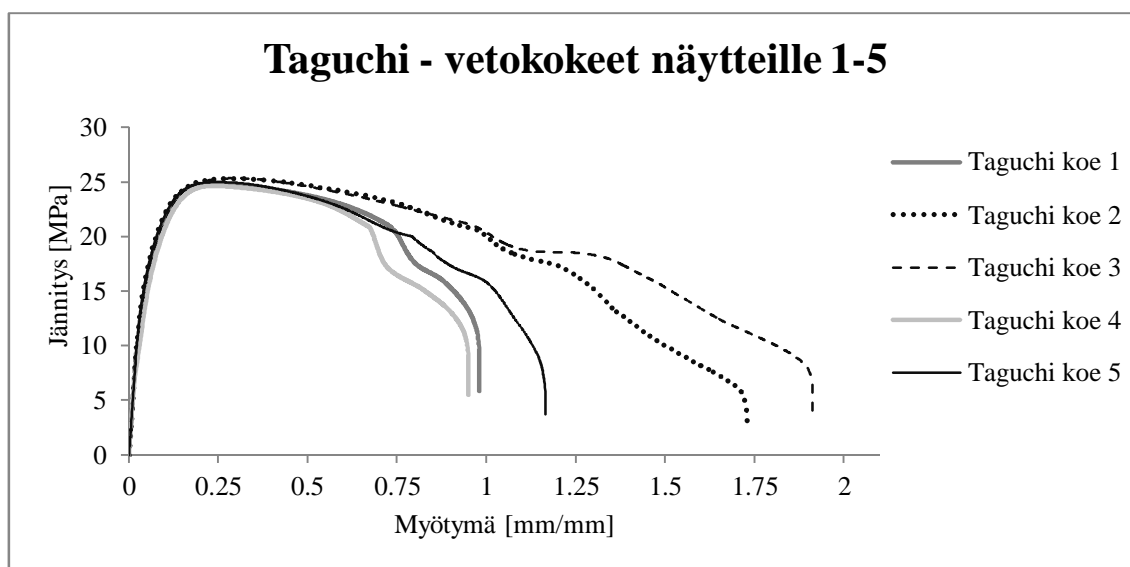
## 6.2.2 Taguchin menetelmän tulokset

Myös Taguchin menetelmän pohjalta ruiskuvaletut tuotteet mitattiin vastaavalla tavalla kuin Stasa QC – ohjelman koeajon pohjalta valetut koesauvat. Näistä mittaustuloksista laskettiin keskiarvot ja ne on listattu seuraavana olevaan taulukkoon 6.5. Vetokoesauvojen valokuvat otettiin myös ja ne ovat nähtävissä kuvissa 6.14 ja 6.15 alapuolella. Koeajosarjan neljäs vetokoesauva jäi täyttymättä kokonaan, tämä on varsin erikoista, sillä parametrien perusteella kyseisen tuotteen olisi pitänyt täyttyä hyvin. On kuitenkin mahdollista, että matala jälkipaine ja suuri vaihtopisteen arvo yhdessä tekivät kappaleen täyttymisen vajaaksi. Matalalla jälkipaineella ei voida kompensoida ruiskutettaessa vajaaksi jäänyttä kappaletta, koska jälkipaineaikakin oli kyseisessä tapauksessa lyhyt. Näiden tietojen pohjalta voidaan saada jonkinlainen käsitys siitä, miksi kappaleet jäivät vajaiksi. Seuraavana taulukossa 6.5 on esitetty Taguchin menetelmän mittaustulokset.

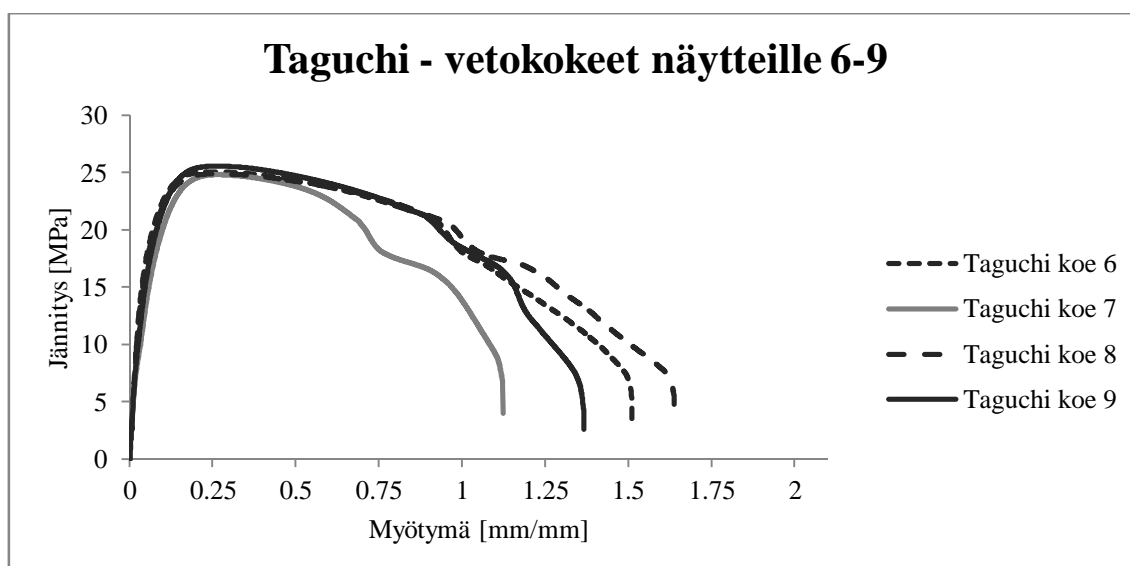
**Taulukko 6.5.** Taguchin menetelmällä valettujen sauvojen mittaustulosten keskiarvot.

Koe	Paksuus [mm]	Leveys [mm]	Massa [g]	Imun määrä [1,2,3]	Purseen määrä [1,2,3]	Kimmomoduli [MPa]	Pituus [mm]
1	3.96	9.87	13.51	2	3	1174.72	165.86
2	3.94	9.90	13.60	2	3	1002.07	165.92
3	4.12	9.99	14.24	3	3	1191.70	166.66
4	3.92	9.81	13.14	1	3	1077.35	164.36
5	3.98	9.95	13.82	2	2	981.04	166.38
6	3.96	9.90	13.67	2	3	1143.39	166.19
7	3.95	9.90	13.65	2	2	1154.02	166.33
8	3.94	9.90	13.49	2	3	1065.26	165.92
9	4.03	10.07	14,18	2	1	1086.37	166.32

Taulukossa 6.5 esitettyjen kimmomodulien arvojen vertailu onnistuu myös kuvaajien 6.12 ja 6.13 avulla. nämä kuvaajat ovat alla esittämässä jokaisen kokeen keskiarvokäyrän muotoa. Yksittäisen kuvaajan valinta tehtiin tutkimalla kokeen keskiarvona saatua suurinta jännityksen arvoa. Lähinnä keskiarvoa ollut vetokoekäyrä valittiin kaikista kokeista edustamaan koko koetta. Tulosta ei siis laskettu erikseen kaikista kokeista, vaan suurimman jännityksen arvon perusteella valittiin lähinnä keskiarvoa ollut näyte.

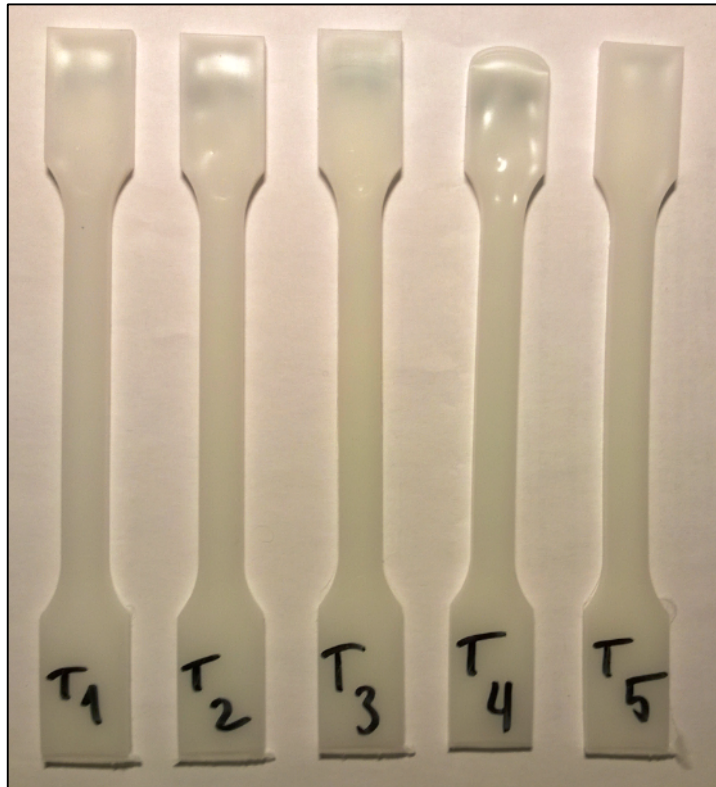


**Kuva 6.12** Taguchin menetelmän pohjalta tehdyn koeajon vetokoekäyrät kokeille 1-5.



**Kuva 6.13.** Taguchin menetelmän pohjalta tehdyn koeajon vetokoekäyrät kokeille 6-9.

Viiden ensimmäisen kokeen koesauvan joukossa oli koejärjestelyn parhaat koesauvat, sillä kokeen nro 3 koesauvat olivat purseen ja imun määrän suhteen parhaimman tuloksen saaneita. Myös vetokokeen tuloksissa tämä koe voitti kaikki muut koekappaleet. Kuvien 6.14 ja 6.15 yläreunassa voidaan havaita koesauvojen imujäljet valon heijastusten avulla, vastaavasti purseilu syntyi pääasiallisesti kappaleiden ruiskutus suunnassa olevaan päähän. Muovi virtaa sulana koesauvojen kuvassa olevasta alaosa, ja esimerkiksi kappaleisiin 5 ja 9 syntyi pursetta tähän osaan.

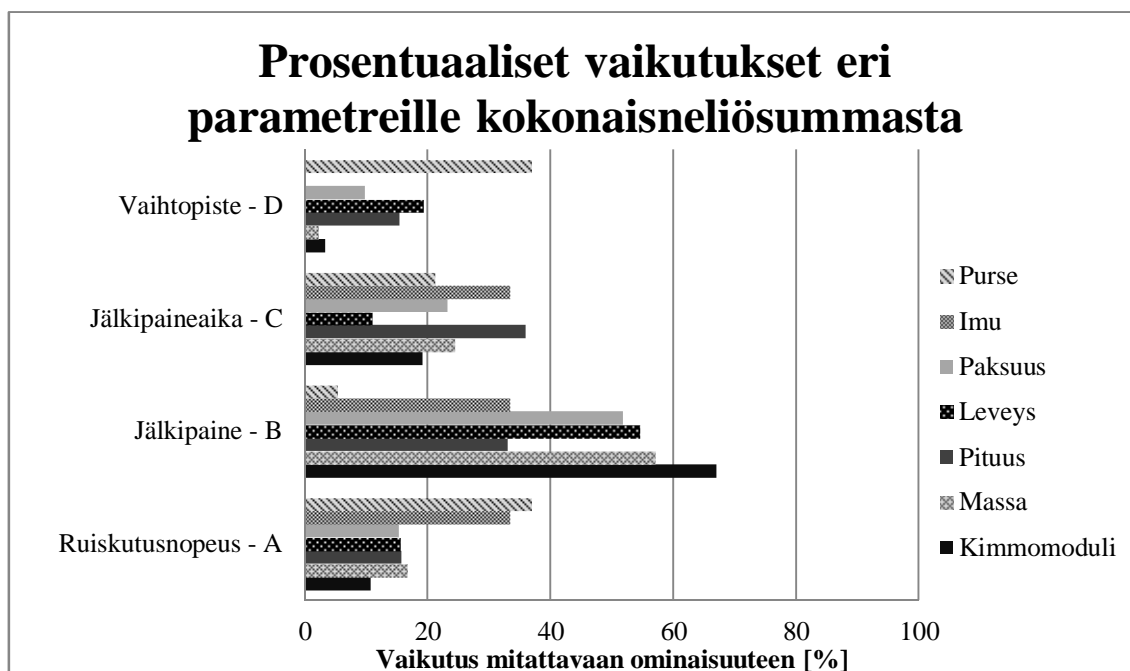


**Kuva 6.14.** Taguchin menetelmän viiden ensimmäisen kokeen valetut kappaleet.



**Kuva 6.15.** Taguchin menetelmän kokeen neljä viimeistä ruiskuvalukappaletta.

Taguchin menetelmän pohjalta tehdyn koeajon parametrien vaikutukset eri mittausominaisuuksiin voidaan nähdä seuraavana kuvassa 6.16. Eri prosessointiparametrien vaikutuksia voidaan vertailla toisiinsa tutkimalla palkkien pituuksien suhteita toisiinsa. Jälkipaineen suhteellisesti pisimmät palkit lähes jokaisessa lopputuotteen luokassa tekevät siitä tärkeimmän yksittäisen prosessointiparametrin. Vastaavasti voidaan tarkastella esimerkiksi purseen syntymiseen vaikuttavia tekijöitä ja huomata, että suurin vaikutus on vaihtopisteen ja ruiskutusnopeuksien arvoilla. Ideaalisesti tulisi saada mittausten jälkeen mahdollisimman yksiselitteisiä yhteyksiä parametrien ja mittausominaisuuksien välille. Tällöin voitaisiin linkittää yksittäinen prosessiparametri suoraan lopputuotteen mitattavaan ominaisuuteen. Muovien prosessoinnin yhteydessä tällainen suora linkitys on harvoin mahdollista, sillä kuten kuvasta 6.16 myös nähdään, vaikuttavat useat tekijät eriasteisesti yksittäiseen mitattavaan ominaisuuteen. Kimmomodulin suhteen voidaan todeta, että jälkipaineen lähes 70 % suuruinen osuus on lähellä tavoiteltavaa tilannetta. Kauas tästä eivät toki jää massa, leveys eikä paksuuskaan, joten kokeen tulosta voi pitää kohtuullisena näiden parametrien osalta.

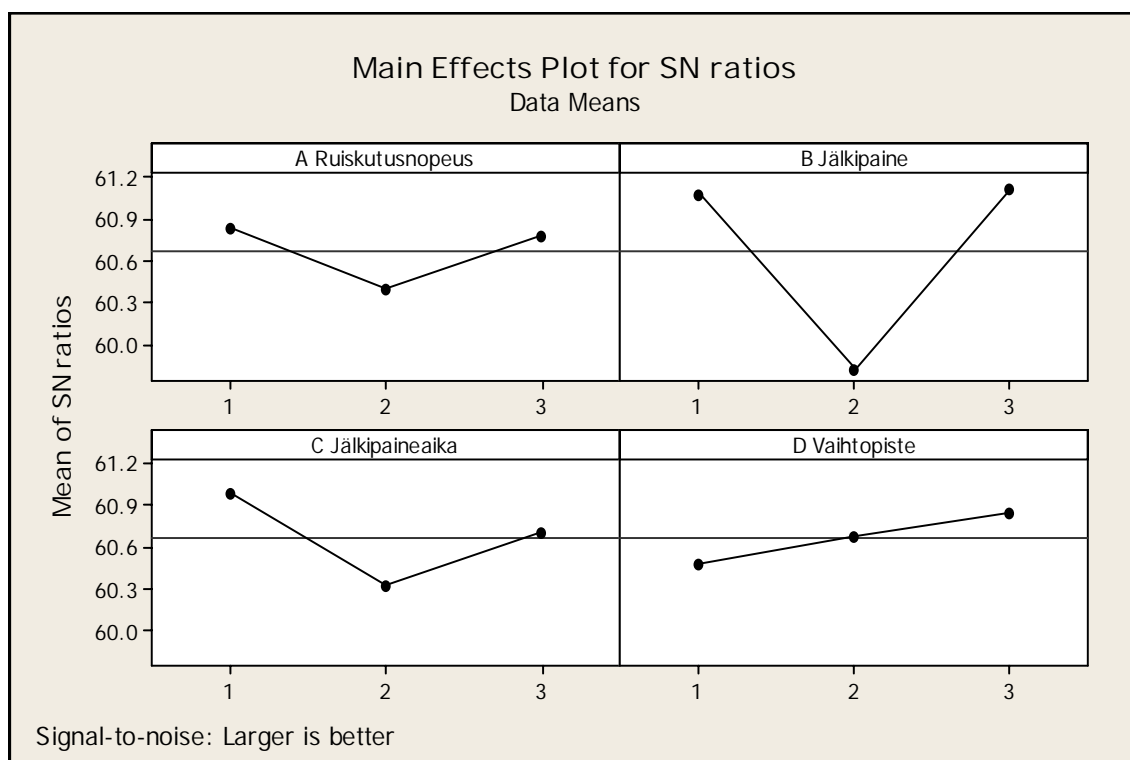


**Kuva 6.16.** Taguchin menetelmän mukaan eri parametrien vaikutusten tulokset prosentuaalisina arvoina.

Heikoimmat tulokset tässä kokeessa saatiin pituuden, imun ja purseen suhteen. Eri-tyisesti imun tulos, jossa vaikutus levittyy 33 % osuudella jälkipaineajan, jälkipaineen arvon ja ruiskutusnopeuden kesken tasan. Tämän perusteella voidaan todeta, että koe ei tuonut lisätietoa imun ongelmien poistamiseen. Ongelma lienee mahdollisesti mittausdatassa, sillä imun määrittämiseen käytetty asteikko yhdestä kolmeen ei tuo kovinkaan suurta vaihtelua lopulliseen mittausdataan. Valtaosa mittaustuloksista sisälsi arvon 2, jolloin siis kaikkien prosessointiparametrien vaikutus oli samanlainen jo mittaustulos-

tenkin perusteella. Tällainen mittausasteikko tulisiikin muuttaa ennen Taguchin menetelmän tulosten laskentaa. Myös purseen suhteen tällainen ongelma tuli vastaan, sillä senkin mittaustulokset olivat samankaltaisia toistensa kanssa. Tästä syystä myös kuvan 6.16 vaikutuksissa purseeseen vaikuttaa lähes yhtä suurella tavalla sekä vaihtopiste että ruiskutusnopeus. Tämän lisäksi jälkipaineaika vaikuttaa myös vahvasti purseen muodostukseen.

Edellä olleen kuvan 6.16 perusteella voitaisiin jo tehdä perustavanlaatuisia päätelmiä lopullisen tuotteen suhteesta prosessiparametreihin, mutta eri tekijöiden välisten yhteisvaikutusten kartoitus suhteessa lopputuotteeseen on myös Taguchin menetelmän tärkeitä osa-alueita. Jotta eri parametrien tasojen vaikutus tuotteeseen voitaisiin saada selville, suoritettiin Minitab-ohjelmalla menetelmän analyysi signaalin ja kohinan (S/N-ratio) suhteen. Alla kuvassa 6.17 on esitetty nämä tulokset kimmomodulin suhteen Minitab-ohjelman muodostamana kuvaajana. Kuvaajassa nähdään yksittäisen kuvaajan otsikkona parametrin nimi ja vaaka-akseleilla parametrin tasot. Nämä tasot esitettiin numeroarvoina taulukossa 5.2. aiemmin.



**Kuva 6.27.** Taguchin menetelmän vastekuvaajat kimmomodulin signaali-kohinasuhteelle ruiskutusnopeudelle, jälkipaineelle, jälkipaineajalle ja vaihtopisteelle.

Kuvan 6.17 perusteella voidaan nähdä suurimman signaalin ja kohinan suhteen omaavat parametrin tasot. Nämä ovat ruiskutusnopeudelle (A) taso 1, jälkipaineelle (B) taso 3, jälkipaineajan (C) osalta taso 1, ja viimeisen tekijän eli vaihtopisteen (D) osalta taso 3. Kuvaajien pisteet on yhdistetty toisiinsa suorilla, jotta vertailu eri signaalin ja kohinan suhteiden osalta helpottuisi. Optimoidun tuotteen koeajossa tullaan noudattamaan prosessointiarvoina siis seuraavia parametreja:

- Ruiskutusnopeus 100 mm/s
- Jälkipaine 1000 bar
- Jälkipaineaika 3 s
- Vaihtopiste 15 mm

Näiden parametrien avulla päästään korkeimpaan kimmomodulin arvoon mittausalueella. Vastaavasti voitaisiin optimoida muutkin tuoteominaisuudet ja tavoitella näistä kaikista yhdistelmänä parasta tuotetta. Kokeiltaessa Stasa QC:lla käyttäen muottilämpötilaa pakotettuna 40 asteen arvoon, saadaan parametreiksi ruiskutusnopeudeltaan ja vaihtopisteeltään samat arvot, mutta jälkipaineen arvoksi ohjelma antaa 900 bar ja jälkipaineajaksi 7 sekuntia. Suurin ero ohjelman ja Taguchin menetelmän välille tulee siis jälkipaineajan suhteen. Ohjelma ottaa kuitenkin huomioon kaikki mitattavat laatuparametrit sen sijaan, että keskittyisi vain kimmomodulin arvoihin, joka Taguchin menetelmässä on tehty. Kimmomodulin tuloksista voidaan koota vastetaulukko, jonka avulla tuloksia ja yksittäisen parametrin vaikutusta voidaan tutkia. Tällainen taulukko löytyy alta nimettynä taulukoksi 6.7. Siinä on esitetty keskimääräinen kimmomodulin arvo, joka parametriyhdistelmällä on saavutettu.

**Taulukko 6.3.** Kimmomodulin vastetaulukko Taguchin menetelmän tuloksista.

Parametrin taso	Ruiskutusnopeus [mm/s]	Jälkipaine [bar]	Jälkipaineaika [s]	Vaihtopiste [mm]
Matalin	1123	1135	1128	1081
Keskimääräinen	1067	1016	1055	1100
Korkein	1102	1140	1109	1111
Erotus	56	124	73	31

Taulukossa 6.7 voidaan nähdä erotusta kuvaavalla rivillä kyseisen parametrin vaikutuksen suuruus tässä tapauksessa kimmomodulin mittausarvoon. Vastaavat taulukot voidaan muodostaa jokaiselle mitattavalle ominaisuudelle. Nämä taulukot löytyvät tämän opinnäytetyön lopusta liitteenä 2. Edellä olleesta taulukosta 6.7 voidaan myös nähdä, että jälkipaine on merkittävin tekijä kimmomodulin arvon muodostuessa, sillä sen erotus on suurin kaikista tekijöistä. Vastaavasti vaihtopisteen vaikutus kimmomoduliin on tutkitusti heikoin. Nämä tulokset ovat yleisen prosessointikäsitteyksen mukaisia. Prosessointiparametrien tehtiin myös Taguchin menetelmään kuuluva varianssianalyysi, joka voidaan nähdä alapuolella taulukkona 6.8. Tämän taulukon tiedot on laskettu Minitab -ohjelmalla.



**Taulukko 6.4.** *Varianssianalyysin tulokset Taguchin menetelmän mittauksille.*

Parametri	DF	SeqSS	AdjSS	Varianssi	F-ratio	P
Ruiskutusnopeus	2	13166	16747	8374	0.69	0.509
Jälkipaine	2	85052	79770	39885	3.28	0.049
Jp-aika	2	32928	34890	17445	1.44	0.251
Vaihtopiste	2	7825	7825	3913	0.32	0.727
Virhe	36	437554	437554	12154		
Total	44	576526				

Taulukon 6.8 yhteydessä on käytetty lyhennettä DF vapausasteille (*degrees of freedom*) ja SeqSS (*sequential sum of squares*) neliösummaa, joka on laskettu ottaen mukaan parametrien keskinäinen järjestys. Näiden lisäksi mukana oleva AdjSS tarkoittaa sovitettua neliösummaa, jossa parametrien järjestys siis ei vaikuta neliösumman arvoon. Sovitetun neliösumman arvon avulla lasketaan F-ratio, joka on kyseisen parametrin ja virheen sovitettujen neliösummien suhde. F-ratio kertoo siis parametrin vaikutuksesta kokonaisuuteen. Myös P arvo kertoo parametrin suhteesta muihin. Sen arvon ollessa alle 0,05 voidaan sanoa, että parametri on merkityksellinen mitattavan ominaisuuden kannalta.

### 6.3 Instrumentoitu ruiskuvalumuotti termoelasteille

Koeajo toteutettiin Tampereen teknillisen yliopiston polymeerilaboratoriossa käyttäen Stasa QC – ohjelmaa osana muotin käyttöönottoprosessin optimointia. Koeajojen jälkeen tuli ilmi, ettei muotin instrumentoinnin keräämä tieto ollut jäänyt tietokoneen muistiin. Tästä huolimatta käyttöönoton yhteydessä tehtävä ”ramp-up” saatiin kuitenkin suoritettua hyvin, sillä tuoteominaisuuksien pohjalta saatiin pienellä koeajon muutoksella optimoitua tuote hyvin.

#### 6.3.1 Koeajon tulokset

Materiaalina koeajossa käytettiin väriltään mustaa Onflex SFR 1923 – materiaalia. Koeajon tulosten yhteenveto on nähtävissä taulukossa 6.9 alla. Kappaleiden irtoamisessa ei koettu minkäänlaisia ongelmia, sillä jokainen koeajon kappale irtosi ehjänä muotista. Kappale valetaan yhdestä pisteestä keskeltä umpinaista päätä, joten siihen ei muodostu yhtymäsaumoja, jotka heikentävät tuotteen venytyskestävyyttä. Mittaukset ja arvioinnit suoritettiin ruiskuvalamisen yhteydessä, jolloin optimointi voitiin tehdä välittömästi prosessoinnin jälkeen. Tuotteet arvioitiin laittamalla ne keskinäiseen järjestykseen purseilun ja muiden ominaisuuksien suhteen. Tämän jälkeen tulokset syötettiin Stasa QC – ohjelmaan.

**Taulukko 6.5.** TPE - kappaleiden mittaustulokset.

Koe	Massan keskiarvo [g]	Keskihajonta	Vajaatäyttyisyys [1,2,3,4,5]	Muotista irtoaminen ehjänä [kyllä, ei]	Purseen määrä [1,2,3]
1	35.52	0,098	5	kyllä	1
2	35.42	0,075	5	kyllä	3
3	35.50	0,179	5	kyllä	1
4	35.42	0,098	5	kyllä	2
5	35.43	0,082	5	kyllä	1
6	35.45	0,055	5	kyllä	1
Optimi	35,42	0,055	5	kyllä	3

Kappaleiden täyttyminen oli myös jokaisessa kokeessa täydellistä, joten kenties koeajossa olisi pitänyt laskea ruiskutusnopeutta ja sitä kautta ruiskutuspainetta muotissa. Näin olisi saatu hieman vajaita kappaleita tulokseksi. Koeajolla saatujen kappaleiden purseilu oli myös melko vähäistä, mutta purseen arviointiin käytetyn asteikon kolme porrasta mahdollistivat tuotteiden jakamisen kolmeen luokkaan. Kuvassa 6.18 on nähtävissä erot suurimman ja pienimmän purseen välillä. Ensimmäisen kokeen keskimääräinen massa oli suurin ja myös purseen määrä on sitä kautta suurin koko koesarjasta. Tämä voidaan nähdä kuvassa 6.18 ensimmäisen kokeen kappaleen reunassa olevana lehtenä. Vastaavasti pienimmän massan arvo saavutettiin toisen ja neljännen kokeen aikana, joka viittaisi myös pienimpään lehden määrään kappaleessa.

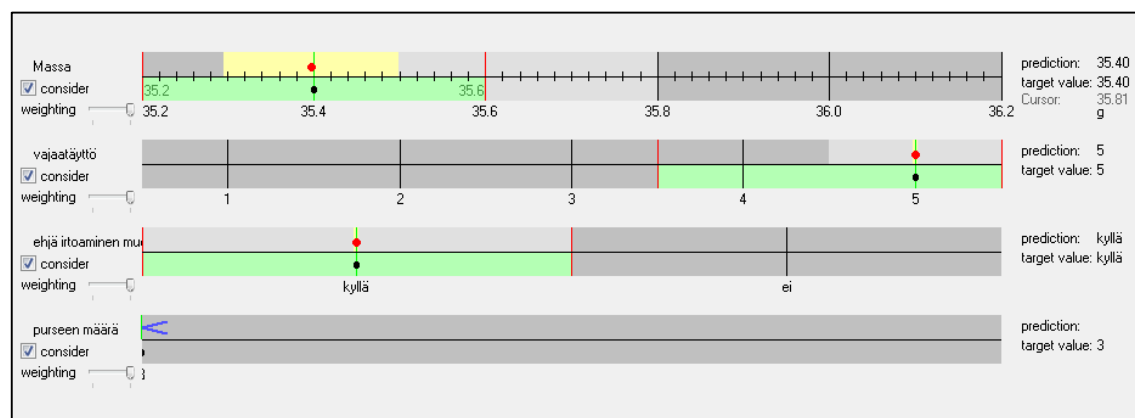
**Kuva 6.38.** TPE-kappaleiden purse kokeista 1 ja 4.

Aivan kokonaan purseen vaikutusta ei massalla voida kuitenkaan selittää, sillä kokeessa 5 massa jäi keskimääräisesti hyvin lähelle koetta 2, mutta silti kokeen 5 kappaleet olivat eniten purseita sisältävässä ryhmässä, joka sai arvosanan 1. Jos palataan tarkastelemaan koeajon parametreja kuvasta 5.10, voidaan nähdä että purseen muodostuk-

seen ovat todennäköisesti vaikuttaneet korkeana yhdistelmänä käytetyt ruiskutusnopeus ja jälkipaine. Erityisesti korkea ruiskutusnopeus tekee kappaleisiin helpommin pursetta. Tämä voidaan todeta tarkastelemalla kuvasta 5.10 ruiskutusnopeuksia, sillä käytettäessä 50 mm/s nopeutta on saatu tuotteisiin vähiten pursetta. Kokeet 2 ja 4 saivat arvosanoiksi 3 ja 2 ja kummassakin oli käytössä 50 mm/s nopeus, sen sijaan kaikki muut kokeet saivat arvosanan 1 purseen osalta.

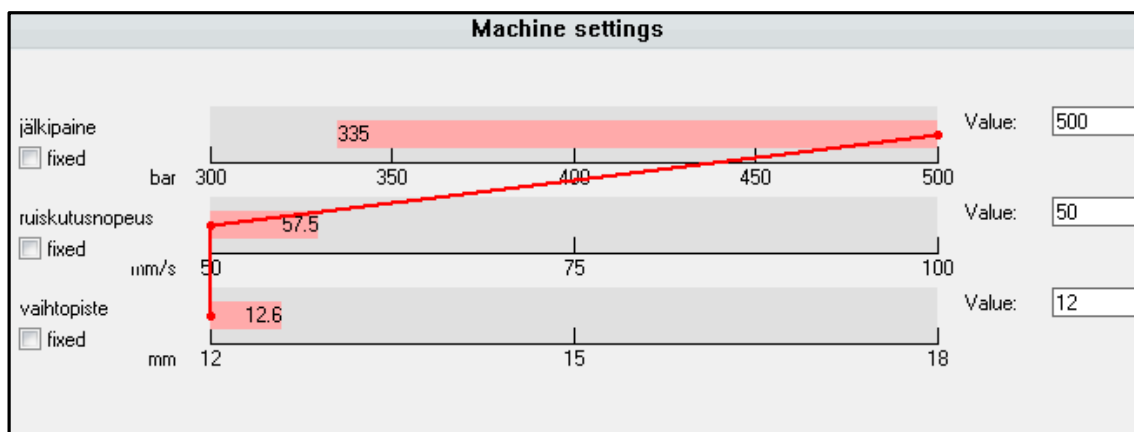
### 6.3.2 Optimoidun TPE - tuotteen ruiskuvalaminen

Stasa QC optimoi prosessin näiden kolmen koneparametrin ja neljän mittausparametrin osalta noin kahdessa minuutissa, kunhan mittaustieto oli syötetty sisään ohjelmaan ensin. Optimituotteen valmistus tehtiin välittömästi optimoinnin valmistuttua. Koko optimointiprosessi vei aikaa noin kolme tuntia aloituksesta optimituotteen valmistukseen ja mittaamiseen. Tähän aikaan ei ole laskettu mukaan koneen lämpenemiseen kuluva aikaa, joka toki tarvittiin ennen prosessoinnin aloittamista. Optimoinnin tuloksena saatiin kuvan 6.19 ennuste tuotteen massalle ja muille ominaisuuksille sekä kuvan 6.20 listaus koneparametreista. Koeajon tuloksista tulkitut purseen ja ruiskutusnopeuden yhteydet ovat nähtävissä myös tässä, sillä ruiskutusnopeudeksi ohjelma ohjeistaa juuri purseettoman tuloksen tuoneen 50 mm/s.



**Kuva 6.19.** Optimituotteen ennuste TPE-ruiskuvalulle.

Kuvassa 6.19 esitetävän optimituotteen ennusteen purseen määrää kuvaava asteikko oli ilmeisesti ohjelmiston sisältämän vian takia väärin näkyvissä. Kuten muiden parametrien kohdalla, myös purseen tapauksessa pitäisi olla näkyvissä asteikko, jolla tätä tuoteparametria arvioidaan. Jokin ohjelmiston sisäinen vika ilmeisesti teki tämän parametrin esitysmuodon tässä tapauksessa vialliseksi. Purseen määrä kuitenkin optimoitiin, kuten muutkin parametrit tässä tapauksessa.



**Kuva 6.20.** Optimituotteen koneparametrit.

Optimituotteista saatiin tavoiteltujen näköisiä, sillä purseen määrä oli vastaava parhaisiin koeajossa saatuihin tuotteisiin verrattuna. Yksi optimituote voidaan nähdä alla kuvassa 6.21. Verrattaessa aiemmin olleen kuvan 6.18 kokeen numero 4 kappaleisiin ovat purseet yhtä suuret kummassakin. Optimoidun tuotteen massat mitattiin ja keskiarvoksi saatiin taulukossa 6.7 esitelty 35,42 g. Myös optimiajon aikana tuotteet irtosivat muotista ehjinä ja ne täyttyivät kokonaan.



**Kuva 6.21.** Optimoitu TPE-tuote.

Yksinkertaisen kolme koneparametria ja neljä tuoteparametria sisältäneen koeajon avulla saatiin tehtyä muotin käyttöönotto noin kolmen tunnin kuluessa aloittamisesta, mikäli ei oteta huomioon ruiskuvalukoneen lämmittämiseen ja esivalmisteluihin kuluva aika. Tuotteen optimointi lähelle tavoitetta onnistui hyvin, sillä tuotteen massan keskiarvo asettui 0,02 g tavoitearvon yläpuolelle. Tämän lisäksi tuotteen visuaalisesti arvioitavat ominaisuudet saavutettiin hyvin. Näistä tuloksista voidaan todeta, että nopeassa optimointiprosessissa Stasa QC toimii hyvin.

## 7 YHTEENVETO

Eri optimointimenetelmiä tutkittiin sekä käynnissä olevan prosessin että uuden ruiskuvalumuotin käyttöönoton yhteydessä. Tarkoituksena oli tutkia myös uuden muotin instrumentointia ja sillä saavutettavia etuja, mutta laitteiston tiedonhallinnan puuttuminen esti tämän tutkimuksen. Eri prosessointimenetelmien tutkimista yritettiin myös, mutta rotaatiovalulaitteiston valmistumisen viivästykset rajasivat tutkimuksen pelkäksi koesuunnitelmaksi. Myös yhteistyöyrityksen resurssipulasta johtuen ekstruusiomenetelmälle tehtävät tutkimukset rajattiin ulos työn aihepiiristä, ja esiteltiin vain koesuunnitelman osalta.

Instrumentoinnin tiedonkeruuongelmien seurauksena tarkasteltiin uuden muotin nopeaa käyttöönottoprosessia, jolla simuloitiin tuotanto-oloissa käynnistettävää prosessia. Stasa QC onnistui optimoimaan uuden prosessin TPE-tuotteen muutaman tunnin työpanoksella, joten sen käyttö tällaisissa tilanteissa on mahdollista ja jopa suositeltavaa. Yritysten muuttuvien prosessien optimointi on aina tehtävä uudestaan, kun prosessi muuttuu, joten vakioitu käytäntö tällaisen ohjelman avulla voisi tuoda huomattavia säästöjä resurssien käytössä.

Uponor Suomi Oy:n käynnissä olevan ruiskuvaluprosessin optimointia kokeiltiin myös Stasa QC – ohjelman avulla, ja nämä tulokset esiteltiin edellisen luvun alussa. Näistä kokeista saatiin lisätietoa siitä, miten Stasa QC – ohjelma toimii, kun käytössä on verrattain pieni määrä tutkimusdataa. Muutamalla koekappaleella suoritettu optimointi tarkoittaa Stasa QC – ohjelman kannalta pientä tilastollista variaatiota, joten se ei välttämättä osaa muodostaa tarkkaa ennustetta. Tämän kaltaiset tulokset saatiinkin, sillä muodostettu malli oli korrelaatiokertoimeltaan matala. Optimoitu tuote poikkesi kuitenkin vain muutamia prosentteja ennusteesta, joten siltä kannalta tarkasteltuna malli oli kuitenkin toimiva.

## LÄHTEET

- [1] S. L. B. Woll ja J. C. Douglas. A Dynamic injection molding process model for simulating mold cavity pressure patterns. [WWW]. [viitattu 15.10.2013]. Saatavissa: <http://www.tandfonline.com/doi/pdf/10.1080/03602559708000662>.
- [2] H. Zhou. Computer modeling for injection molding: Simulation, optimization and control. [WWW]. [Viitattu 16 8 2013]. Saatavissa: <http://site.ebrary.com/lib/ttyk/docDetail.action?docID=10648915&p00>.
- [3] M. Kutz. Applied Plastics Engineering Handbook. [WWW]. [Viitattu 15.6.2013]. Saatavissa: <http://www.sciencedirect.com/science/book/9781437735147>.
- [4] P. Coates. Polymer processing: On-line monitoring. 2001. [WWW]. [Viitattu 12.6.2013]. Saatavissa: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B0080431526013334>.
- [5] A. Kelly, M. Woodhead, R. Rose ja P. Coates. In process monitoring of polymer batch to batch variation in injection molding. [WWW]. [Viitattu 5.6.2013]. Saatavissa: <http://www.ingentaconnect.com/content/maney/prc/2000/00000029/00000001/art00003>.
- [6] M. Kurt, O. S. Kamber, Y. Kaynak, G. Atakok ja O. Girit. Experimental investigation of plastic injection molding: Assessment of the effects of cavity pressure and mold temperature on the quality of the final products. [WWW]. [Viitattu 15.6.2013]. Saatavissa: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0261306909000089>.
- [7] J. S. Wilson. Sensor Technology Handbook. [WWW]. [Viitattu 12.6.2013]. Saatavissa: <http://www.sciencedirect.com/science/book/9780750677295>.
- [8] R. Dubay, A. Bell ja Y. Gupta. Control of plastic melt temperature: a multiple input multiple output model predictive approach. [WWW]. [Viitattu 29.8.2013]. Saatavissa: <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/pen.11803/pdf>.
- [9] D. V. Rosato, D. V. Rosato ja M. V. Rosato. Plastic product material and process selection handbook. [WWW]. [Viitattu 12.6.2013]. Saatavissa: <http://www.sciencedirect.com/science/book/9781856174312>.
- [10] C. Adeyko, P. J. Martin, A. L. Kelly ja E. C. Brown. A review and evaluation of melt temperature sensors for polymer extrusion. Sensors and actuators A: Physical. 8/2012. [WWW]. [Viitattu 9.9.2013]. Saatavissa: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0924424712002658>.
- [11] T. Rohe, W. Becker, A. Krey, H. Nägele ja S. E. N. Kölle. In-line monitoring of polymer extrusion processes by NIR spectroscopy. 17.5.1998. [WWW]. [Viitattu 12.6.2013]. Saatavissa: [http://www.camo.com/downloads/In-line\\_monitoring\\_of\\_polymer\\_extrusion\\_by\\_NIR\\_spectroscopy.pdf](http://www.camo.com/downloads/In-line_monitoring_of_polymer_extrusion_by_NIR_spectroscopy.pdf).

- [12] E. C. Brown, P. Olley ja P. D. Coates. In line melt temperature measurement during real time ultrasound monitoring of single screw extrusion. 1.1.2000. [WWW]. [Viitattu 9.10.2013]. Saatavissa: <http://www.ingentaconnect.com/content/maney/prc/2000/00000029/00000001/art00001>.
- [13] D. O. Kazmer, S. Velusamy, S. Westerdale, S. Johnston ja R. X. Gao. A comparison of seven filling to packing switchover methods for injection molding. Polymer engineering and science. 10/ 2010. [WWW]. [Viitattu 31.7.2013]. Saatavissa: <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/pen.21731/abstract>.
- [14] J. H. Giles, J. R. Wagner ja E. M. Mount III. Extrusion - The Definitive Processing Guide and Handbook. 2005. [WWW]. [Viitattu 5.7.2013]. Saatavissa: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780815514732500040>.
- [15] Laatikainen, Jani. Myyntiedustaja, Kistler Nordic Oy. Tampere. Haastattelu 1.8.2013.
- [16] L. Zhang, C. B. Theurer, R. X. Gao ja D. O. Kazmer. A self-energized sensor for wireless injection mold cavity pressure measurement: Design and evaluation. ASEM digital collection. 1.6.2004. [WWW]. [Viitattu 24.7.2013]. Saatavissa: <http://dynamicsystems.asmedigitalcollection.asme.org/article.aspx?articleid=1410327>.
- [17] F. Müller, G. Rath, T. Lucyshyn, C. Kukla, M. Burgsteiner ja C. Holzer. Presentation of a novel sensor based on acoustic emission in injection molding. Journal of applied science. 15.3.2013. [WWW]. [Viitattu 10.9.2013]. Saatavissa: <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/app.38083/full>.
- [18] W. Dargie ja C. Poellabauer. Fundamentals of wireless sensor networks theory and practice. 1.10.2010. [WWW]. [Viitattu 14.8.2013]. Saatavissa: <http://site.ebrary.com/lib/ttyk/docDetail.action?docID=10395571&adv.x=1&p00=wireless+sensor+networks&f00=all&p01=%22Sensor+Networks%22&f01=subject>.
- [19] D. Fronimidis, K. Edge, K. Stelson, A. Mileham ja M. Sokola. Use of non-invasive measurement methods to aid the control of part quality in the injection molding process. Proceedings of the institution of mechanical engineers, part B: journal of engineering manufacture. 1.9.2004. [WWW]. [Viitattu 7.10.2013]. Saatavissa: <http://pib.sagepub.com/content/218/9/1195.full.pdf+html>.
- [20] R. Edwards ja C. Thomas. On-line measurement of polymer orientation using ultrasonic technology. 7.4.2004. [WWW]. [Viitattu 8.10.2013]. Saatavissa: <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/pen.10862/pdf>.
- [21] Y.-W. Lin ja J. J. Cheng. Model-based melt flow virtual sensors for filling process of injection molding. Polymer engineering and science. 22.1.2008. [WWW]. [Viitattu 26.9.2013]. Saatavissa: <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/pen.20960/pdf>.

- [22] J. Antony. Design of experiments for engineers and scientists. Elsevier, 2003. [WWW]. [Viitattu 6.11.2013]. Saatavissa: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780750647090500004>.
- [23] K. Park ja J.-. O. Ahn. Design of experiment considering two-way interactions and its application. 24.10.2003. [WWW]. [Viitattu 4.11.2013]. Saatavissa: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0924013603010045>.
- [24] R. D. Moen, T. W. Nolan ja L. P. Provost. Quality Improvement Through Planned Experimentation. Kolmas painos. [WWW]. 2012. [Viitattu 8.11.2013]. Saatavissa: <http://accessengineeringlibrary.com/browse/quality-improvement-through-planned-experimentation-third-edition>.
- [25] K. Yang ja S. E.-H. Basem. Design for Six Sigma: A Roadmap for Product Development, Second Edition. [WWW]. 2003. [Viitattu 7.11.2013]. Saatavissa: <http://accessengineeringlibrary.com/browse/design-for-six-sigma-a-roadmap-for-product-development-second-edition>.
- [26] C. R. Hicks. Fundamental concepts in the design of experiments. New York: Oxford university press Inc. 1993. 349 sivua.
- [27] G. Taguchi, Introduction to quality engineering, Tokio: Asian Productivity Organisation, 1986. 191 sivua.
- [28] Y. Fei, M. ., L. H. huajie, G. Wei ja S. Maosheng. Back propagation neural network modeling for warpage prediction and optimization of plastic products during injection molding. [WWW]. 17.12.2010. [Viitattu 15 6 2013]. Saatavissa: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0261306910007508>.
- [29] J. L. W. L. M. H. Chiaming Yen. "An abductive neural network approach to the design of runner dimensions for the minimization of warpage in injection moldings. [WWW]. 4.2.2005. [Viitattu 5 7 2013]. Saatavissa: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0924013605002839>.
- [30] Y. Fei, M. Huajie ja H. Lin. A hybrid back propagation neural network and genetic algorithm for optimization of injection molding process parameters. [WWW]. 24.2.2011. [Viitattu 5.7.2013]. Saatavissa: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0261306911000781>.
- [31] B. Sadeghi. A BP-neural network predictor model for plastic injection molding process. [WWW]. 28.1.2000. [Viitattu 5.7.2013]. Saatavissa: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0924013600004982>.
- [32] N. K. Kasabov. Foundations of Neural Networks, Fuzzy Systems, and Knowledge Engineering. MIT Press, Cambridge, 1996. 581 sivua.
- [33] H. Lau, A. Ning, K. Pun ja K. Chin. Neural networks for the dimensional control of molded parts based on a reverse process model. [WWW]. 2.11.2001. [Haettu 11.7.2013]. Saatavissa: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S092401360101086X>.



- [34] S. Liao, W. Hsieh, J. Wang ja Y. Su. Shrinkage and Warpage Prediction of Injection-Molded. *Polymer engineering and science*. 44(2004)11, pp. 2029-2040
- [35] L. Jain ja N. Martin. Fusion of neutral networks, fuzzy sets and genetic algorithms. [WWW]. 1999. [Viitattu 15.6.2013]. Saatavissa: <http://www.crcpress.com/product/isbn/9780849398049>
- [36] B. Ozcelik ja T. Erzurumlu. Comparison of the warpage optimization in the plastic injection molding using ANOVA, neural network model and genetic algorithm. [WWW]. 1.2.2005. [Viitattu 15.6.2013]. Saatavissa: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S092401360500806X>.
- [37] D. E. Goldberg. Genetic algorithms in search optimization and machine learning. Reading. Addison-Wesley. 1989. 412 sivua.
- [38] A. A. Hopgood. Intelligent systems for engineers and scientists. CRC Press. 2011.
- [39] J. Korst, E. Aarts ja W. Michiels. Handbook of Approximation Algorithms and Metaheuristics. Chapman and Hall. [WWW]. 2007. [Viitattu 17.10.2013]. Saatavissa: <http://www.crcnetbase.com/isbn/978-1-58488-550-4>.
- [40] E. Aarts ja J. Korst. Simulated annealing and Boltzmann machines. Tiptree 1989. John Wiley & Sons. 284 sivua.
- [41] J. Kennedy, R. C. Eberhart ja Y. Shi. Swarm intelligence. [WWW]. 2001. [Viitattu 25.10.2013]. Saatavissa: <http://www.sciencedirect.com/science/book/9781558605954#ancPR2>.
- [42] R. C. Eberhart ja Y. Shi. Computational Intelligence. [WWW]. 2007. [Viitattu 25.10.2013]. Saatavissa: <http://www.sciencedirect.com/science/book/9781558607590>.
- [43] Y. C. Lam ja L. W. Seow. Cavity balance for plastic injection molding. [WWW]. 2000. [Viitattu 22.8.2013]. Saatavissa: <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/pen.11255/pdf>.
- [44] C. Shen, L. Wang ja Q. Li. Optimization of injection molding process parameters using combination of artificial neural network and genetic algorithm method. [WWW]. 23.3.2007. [Viitattu 31.10.2013]. Saatavissa: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0924013606008958>.
- [45] H. Kurtaran, B. Ozcelik ja T. Erzurumlu. Warpage optimization of a bus ceiling lamp base using neural network model and genetic algorithm. [WWW]. 10.11.2005. [Viitattu 16.8.2013]. Saatavissa: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0924013605004796>.
- [46] H. Oktem, T. Erzurumlu ja I. Uzman. Application of taguchi optimization technique in determining plastic injection molding process parameters for a thin-shell part. [WWW]. [Viitattu 5.7.2013]. 3.3.2007. Saatavissa: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0261306906000100>.
- [47] D. Cardozo. A Brief history of the filling simulation of injection molding.

- Proceedings of the institution of mechanical engineers, partC: Journal of mechanical engineering science. [WWW]. 1.3.2009. [Viitattu 10.9.2013]. Saatavissa: <http://pic.sagepub.com/content/223/3/711>.
- [48] D. Li, H. Zhou, P. Zhao ja Y. Li. A Real-Time Process Optimization System for Injection Molding. Wiley Online Library. [WWW]. 2.7.2009. [Viitattu 10.9.2013]. Saatavissa: <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/pen.21444/pdf>.
- [49] Minitab Inc. Minitab 16. 2013. [WWW]. [Viitattu 4.10.2013]. Saatavissa: <http://www.minitab.com/en-GB/>.
- [50] Dassault Systemes Solidworks Corp. Solidworks Plastics. Dassault Systemes, [WWW]. 2012. Saatavissa: [http://www.solidworks.com/sw/docs/SW\\_Plastics\\_DS\\_2013.pdf](http://www.solidworks.com/sw/docs/SW_Plastics_DS_2013.pdf). [Viitattu 25.7.2013].
- [51] C. Maier ja T. Calafut. Polypropylene the definitive user's guide and databook. Plastics design library. [WWW]. 1998. [Viitattu 18.10.2013]. Saatavissa: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9781884207587500321>.
- [52] Z. Chen ja L.-. S. Turng. Injection molding quality control by integrating weight feedback into a cascade closed-loop control system. [WWW]. 30.4.2007. [Viitattu 10.10.2013]. Saatavissa: <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/pen.20769/pdf>.
- [53] Rämö, Kosti. Fanuc ruiskuvalukone. Tampereen teknillinen yliopisto, 8.12.2012. [WWW]. [Viitattu 18.10.2013]. Saatavissa: <http://www.tut.fi/fi/tietoa-yliopistosta/laitokset/materiaalioppi/tutkimus/tutkimuslaitteet/polymeerien-prosessointi/fanuc-ruiskuvalukone/index.htm>.
- [54] Babur, O., Ibrahim, S. Warpage and structural analysis of thin shell plastic in the plastic injection molding. Materials and design. pp. 367-375. 1.5.2008.
- [55] R. H. Bishop. The Mechatronics Handbook. CRC Press 26.2.2002. [WWW]. [Viitattu 29.8.2013]. Saatavissa: <http://www.crcnetbase.com/doi/book/10.1201/9781420042450>.
- [56] R. X. Gao, Z. Fan ja D. O. Kazmer. Injection molding process monitoring using a self-energised dual-parameter sensor. 2008. CIRP Annals - Manufacturing Technology. [WWW]. [Viitattu 10.9.2013]. Saatavissa: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0007850608000413>.






**LIITE 1: PARAMETRIEN SIGNAALIN JA KOHINAN SUHTEIDEN TAULUKKO TAGUCHIN MENETELMÄN MITTAUSTULOKSILLE VETOKOESAUVAN OSALTA**

S/N - suhteet	A Ruiskutusnopeus	B Jälki- paine	C Jälkipaine- aika	D Vaihto- piste	
Kimmomodu- li	Taso 1	21.72	27.39	26.33	21.09
	Taso 2	26.65	16.75	23.36	26.11
	Taso 3	23.73	27.95	22.4	24.9
	Vaihteluvä- li	4.93	11.21	3.93	5.02
Massa	Taso 1	42.36	40.53	47.19	43.92
	Taso 2	41.1	44.23	37.83	42.07
	Taso 3	42.23	40.92	40.66	39.7
	Vaihteluvä- li	1.27	3.7	9.36	4.23
Pituus	Taso 1	61.78	54.59	63.08	64.94
	Taso 2	52.78	60.18	55.85	60.06
	Taso 3	64.69	64.49	60.33	54.26
	Vaihteluvä- li	11.91	9.9	7.23	10.68
Paksuus	Taso 1	39.1	46.39	49.1	49.46
	Taso 2	47.51	49.13	46.1	48.37
	Taso 3	49.46	40.54	40.86	38.24
	Vaihteluvä- li	10.36	8.59	8.24	11.22
Leveys	Taso 1	9.919	9.865	9.89	9.975
	Taso 2	9.893	9.918	9.94	9.899
	Taso 3	9.961	9.991	9.944	9.9
	Vaihteluvä- li	0.068	0.126	0.053	0.076






## LIITE 2: VASTEKESKIARVOT TAGUCHIN MENETELMÄLLÄ TUTKITUILLE PARAMETREILLE

Vastekeskiarvot		A Ruisku- tusnopeus	B Jälkipaine	C Jälki- paineaika	D Vaihtopiste
Kimmo- moduli [MPa]	Taso 1	1123	1135	1128	1081
	Taso 2	1067	1016	1055	1100
	Taso 3	1102	1140	1109	1111
	Vaihtelu- väli	56	124	73	31
Massa [g]	Taso 1	42.36	40.53	47.19	43.92
	Taso 2	41.1	44.23	37.83	42.07
	Taso 3	42.23	40.92	40.66	39.7
	Vaihtelu- väli	1.27	3.7	9.36	4.23
Pituus [mm]	Taso 1	166.1	165.5	166	166.2
	Taso 2	165.6	166.1	165.5	166.1
	Taso 3	166.2	166.4	166.5	165.6
	Vaihtelu- väli	0.5	0.9	0.9	0.5
Paksuus [mm]	Taso 1	4.007	3.941	3.951	3.987
	Taso 2	3.952	3.953	3.963	3.951
	Taso 3	3.97	4.036	4.016	3.992
	Vaihtelu- väli	0.055	0.095	0.065	0.041
Leveys [mm]	Taso 1	9.919	9.865	9.89	9.975
	Taso 2	9.893	9.918	9.94	9.899
	Taso 3	9.961	9.991	9.944	9.9
	Vaihtelu- väli	0.068	0.126	0.053	0.076






### LIITE 3: ERI KONEPARAMETRIEN VAIKUTUS VETOKOESAUVAN LAATU-PARAMETREIHIN STASA QC – OHJELMAN KUVAKAAPPAUKSINA

Quality features	Estimated explanatory values of machine parameters		
Paksuus Leveys Massa Imun määrä Purseen määrä Kimmomoduli Pituus	Machine parameter	Explanatory value for selected quality feature	Impact
	Jälkipaine	 65.2%	high
	Vaihtopiste	12.8% 	average
	Ruiskutusnopeus	11.7% 	average
	Jälkipaineaika	 7.9%	low
	Muotin (villennysveden) lämpötila	 2.4%	low





  

Quality features	Estimated explanatory values of machine parameters		
Paksuus Leveys Massa Imun määrä Purseen määrä Kimmomoduli Pituus	Machine parameter	Explanatory value for selected quality feature	Impact
	Jälkipaine	 62.2%	high
	Vaihtopiste	11.1% 	average
	Muotin (villennysveden) lämpötila	 10.7%	average
	Jälkipaineaika	 8.3%	low
	Ruiskutusnopeus	7.7% 	low






  

Quality features	Estimated explanatory values of machine parameters		
Paksuus Leveys Massa Imun määrä Purseen määrä Kimmomoduli Pituus	Machine parameter	Explanatory value for selected quality feature	Impact
	Jälkipaine	 55.1%	high
	Jälkipaineaika	 26.3%	high
	Vaihtopiste	13.7% 	average
	Ruiskutusnopeus	2.6% 	low
	Muotin (villennysveden) lämpötila	 2.3%	low






  

Quality features	Estimated explanatory values of machine parameters		
Paksuus Leveys Massa Imun määrä Purseen määrä Kimmomoduli Pituus	Machine parameter	Explanatory value for selected quality feature	Impact
	Jälkipaine	 50.1%	high
	Jälkipaineaika	 48.5%	high
	Vaihtopiste	1.2% 	low
	Ruiskutusnopeus	0.1% 	low
	Muotin (villennysveden) lämpötila	0.0%	low

Quality features	Estimated explanatory values of machine parameters		
Paksuus Leveys Massa Imun määrä Purseen määrä Kimmomoduli Pituus	Machine parameter	Explanatory value for selected quality feature	Impact
	Jälkipaine	33.5% 	high
	Vaihtopiste	 29.3%	high
	Ruiskutusnopeus	 17.2%	average
	Jälkipaineaika	11.7% 	average
	Muotin (villennysveden) lämpötila	8.3% 	low

Quality features	Estimated explanatory values of machine parameters		
Paksuus Leveys Massa Imun määrä Purseen määrä Kimmomoduli Pituus	Machine parameter	Explanatory value for selected quality feature	Impact
	Jälkipaine	 36.5%	high
	Muotin (villennysveden) lämpötila	 22.2%	high
	Vaihtopiste	 17.5%	average
	Jälkipaineaika	 13.4%	average
	Ruiskutusnopeus	10.3% 	average

Quality features	Estimated explanatory values of machine parameters		
Paksuus	Machine parameter	Explanatory value for selected quality feature	Impact
Leveys	Jälkipaineaika	<div><div></div></div> 39.5%	high
Massa	Jälkipaine	<div><div></div></div> 25.0%	high
Imun määrä	Muotin (viilennysveden) lämpötila	22.4% <div><div></div></div>	high
Purseen määrä	Vaihtopiste	9.5% <div><div></div></div>	low
Kimmomoduli	Ruiskutusnopeus	<div><div></div></div> 3.7%	low
Pituus			